

Modellierung von Getreidebestandsspektren zur Korrektur BRDF-bedingter Einflüsse auf Vegetationsindizes im Rahmen der EnMAP-Mission

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium
im Fach Geographie

eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. Theres Küster (geb. Peisker)

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin:
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II:
Prof. Dr. Elmar Kulke

Gutachter:

1. Prof. Dr. Patrick Hostert
2. Prof. Dr. Hermann Kaufmann
3. Prof. Dr. Manfred F. Buchroithner

eingereicht am: 04.05.2011

Tag der mündlichen Prüfung: 03.08.2011

Zusammenfassung

Das Monitoring von Landwirtschaftsflächen ist eines der Kernthemen der zukünftigen EnMAP Mission, einem deutschen, hyperspektralen Fernerkundungssensor, dessen Start für 2015 geplant ist. In Vorbereitung dieser Mission gehören die Erweiterung und Entwicklung objektiver, robuster sowie zuverlässiger Methoden zur Ableitung biophysikalischer Parameter zu den Hauptaufgaben. Die für das Monitoring von Vegetation notwendige hohe zeitliche Auflösung wird durch ein stufenloses Schwenken von bis zu $\pm 30^\circ$ quer zur Flugrichtung erreicht. Daraus resultiert, dass die Daten durch variierende Ein- und Ausstrahlungsgeometrien stark beeinflusst werden. Daher ist eine detaillierte Kenntnis der bidirektionalen Reflexionsfunktion (engl. *bidirectional reflectance distribution function*, BRDF) der beobachteten Oberflächen notwendig, um diese Einflüsse auf das Reflexionssignal zu identifizieren und anschließend zu korrigieren.

Zu diesem Zweck wurde in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, auf der Basis von simulierten Spektren realistische BRDF Szenarien zu modellieren und oberflächenspezifische Korrekturfunktionen abzuleiten. Die Methodik besteht aus drei aufeinander aufbauenden Komponenten. Im ersten Schritt erfolgt die Modellierung der BRDF von landwirtschaftlichen Vegetationsbeständen. Im zweiten Schritt wird der Einfluss der Bestandsarchitektur auf die BRDF analysiert. Darüber hinaus wird untersucht, inwiefern sich Variationen in der BRDF auf die quantitative Ausprägung von Vegetationsindizes auswirken. Solche Indizes sind eine häufig genutzte Möglichkeit zur Quantifizierung biophysikalischer Parameter im Rahmen empirischer Verfahren. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden im dritten Schritt Korrekturfunktionen für ausgewählte Vegetationsindizes entwickelt, um Schrägblickbeobachtungen in Nadirbeobachtungen zu transformieren. Abschließend wurde die entwickelte Methodik auf simulierte, sensorspezifische Spektren übertragen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein spektrales, räumliches und zeitliches Simulationssystem zur Modellierung der BRDF entwickelt. Besonderheit dieses Systems ist die Integration detaillierter, virtueller 3D-Getreidebestände in verschiedenen Wachstumsstadien, deren Geometrien mit den entsprechenden spektralen Informationen überlagert werden können. Dies ermöglicht die Simulation realistischer Reflexionen auf der Grundlage virtueller 3D-Szenen unter Berücksichtigung jeder möglichen Beobachtungsposition. Die Interpolation vieler einzelner Beobachtungen ermöglicht die Approximation der BRDF. Durch Parametrisierung ausgewählter Bestandsstrukturmerkmale, wie z.B. des Wachstumsstadiums und des Reihenabstandes, ist es möglich, die BRDF zahlreicher unterschiedlicher Getreidebestände zu modellieren.

Für die Untersuchungen des Einflusses der Bestandsarchitektur auf die BRDF wurden insgesamt über 4000 verschiedene Getreidebestände mit variierenden Bestandsstrukturmerkmalen einbezogen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Merkmalsvariation einen deutlichen Einfluss auf die spektrale Reflexion im roten und im nahen Infrarotbereich hat. Dieser drückt

sich in lokalen und globalen Formveränderungen der BRDF signifikant aus. Darüber hinaus wurde der Einfluss von bestandsabhängigen BRDF-Variationen auf die Ausprägung der Vegetationsindizes untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Vegetationsindexfunktion (engl. *vegetation index distribution function*, VIDF) eingeführt. Die Analyse der VIDF-Formen konnte aufzeigen, dass einzelne Bestandsstrukturmerkmale einen deutlichen Einfluss haben. Im Gegensatz zur BRDF weist dieser unterschiedliche Intensitäten in Abhängigkeit vom spektralen Index auf. Auf Grundlage dieser Analysen wurde eine Methode entwickelt, um nadirblick-bezogene Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen zu bestimmen. Dabei wurden basierend auf einer empirischen Analyse aller modellierten VIDF Korrekturfunktionen abgeleitet.

Die entwickelte Korrekturmethode wurde erfolgreich auf simulierte Daten zukünftiger Satellitenmissionen (EnMAP und Sentinel-2) angewendet. Für die korrigierten Vegetationsindizes ergaben Genauigkeitsuntersuchungen mittels Kreuzvalidierung ein hohes Bestimmtheitsmaß von $\geq 0,85$ für mindestens 80 % der untersuchten Fälle. Diese Methodik ermöglicht darüber hinaus eine Steigerung der Genauigkeit durch die Berücksichtigung von Bestandsstrukturmerkmalen wie z.B. der Reihenorientierung. Abschließend konnte die praktische Relevanz der Korrekturmethode für das Beispiel des Blattflächenindex (LAI) gezeigt werden. Der LAI konnte im Mittel 25 % genauer durch die Korrektur der Vegetationsindizes bestimmt werden. Diese Ergebnisse zeigen auch, dass im Falle von Schrägblickbeobachtungen die Korrektur von winkelabhängigen Einflüssen zu deutlich verbesserten Ergebnissen führt und notwendig ist. Damit leistet die entwickelte Methodik einen wichtigen Beitrag für die Ableitung qualitativ hochwertiger thematischer Produkte aus Daten zukünftiger Satellitenmissionen.

Abstract

Monitoring of arable crops is one of the core applications of the upcoming spaceborne EnMAP mission, a German hyperspectral imaging spectrometer scheduled for launch in 2015. During the present preparatory phase one of the primary tasks is the development of accurate, robust and reliable retrieval methods for biophysical canopy parameters. Monitoring of crop canopies requires a frequent temporal coverage. In case of EnMAP, this will be realised by an off-nadir pointing of the sensor up to $\pm 30^\circ$ across to the flight direction. The off-nadir pointing leads to data strongly influenced by varying acquisition geometry. Therefore, detailed knowledge of bidirectional reflectance distribution functions (BRDF) of the observed surfaces is necessary to identify and to correct BRDF influenced reflectance signals.

For this purpose, a methodology was developed that allows modelling of realistic BRDF scenarios and of surface-specific correction functions. This methodology consists of three consecutive parts. In the first part, modelling of the BRDF of crop canopies was performed. In the second part, the influence of canopy architecture on the BRDF was analysed. Additionally, the BRDF related dependencies of vegetation indices were investigated. Such indices are widely used to quantify biophysical canopy parameters based on empirical methods. In the third part, correction functions were developed for selected vegetation indices to enable a transformation from off-nadir into nadir observations. These correction functions incorporate results obtained in the second part of the methodology. Finally, the developed methodology was applied on sensor-specific simulated spectra.

A spectral, spatial and temporal simulation system was developed to model the BRDF of different cereal canopies. This was realised by an integration of detailed virtual 3D cereal canopies of different growth stages, whose geometries were linked with corresponding spectral information. This system enables the simulation of realistic reflectance spectra on the basis of virtual 3D scenarios incorporating any possible viewing position. The interpolation of these different observations results in the approximation of the BRDF. Parameterisation of a number of canopy structure parameters such as growth stage and row distance, enables modelling the BRDF for many different cereal canopies.

A total of 4000 different cereal canopies characterized by varying structure parameters was modelled and used as a basis for analysing of the influence of canopy architecture on the BRDF. The results show a distinct influence on reflectance within the red and near infrared wavelength range in form of local and global variations of the shape of the BRDF. Furthermore, the influence of canopy dependent BRDF effects on the value of vegetation indices was analysed. For this purpose, the vegetation index distribution function (VIDF) was introduced. The resulting VIDF shape shows distinct influences of canopy structure parameters. In contrast to the BRDF, these structure parameters have different impacts on the VIDF depending on the calculated index. Based on these findings a method was developed that allows transforming observations from off-nadir to nadir by incorporating empirical analyses

of all modelled VIDF.

The developed correction method was successfully applied to simulated sensor data of future optical satellite missions (EnMAP and Sentinel-2). Accuracy assessment was performed by cross validation and resulted in a high coefficient of determination of 0.85 for at least 80 % of the analysed cases. Furthermore, the method enables an increase in accuracy by incorporating canopy structure parameters such as orientation of drilling rows. Finally, the practical relevance of the developed correction method was exemplarily shown for the leaf area index (LAI). The accuracy of LAI retrieval was improved by about 25 % using previously corrected vegetation indices. These results show that the correction of angle dependent influences on off-nadir observations is necessary and concurrently leads to a significant high accuracy. Thus, the developed approach represents an important contribution to the derivation of high quality products of future satellite missions.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Formelverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Spektroskopie	5
2.1 Physikalische Grundlagen	5
2.1.1 Strahlungsquelle	5
2.1.2 Atmosphäre	6
2.1.3 Strahlungskomponenten	7
2.2 Spektrale Charakteristika	9
2.3 Reflexionsgrad, Reflexionsfaktor und Reflexionsfunktion	11
2.4 Abbildende Spektrometer	13
2.4.1 Räumliche Aufnahmeprinzipien	14
2.4.2 Spektrale Aufnahmeprinzipien	14
2.4.3 Kenngrößen	14
2.4.3.1 Spektrale Abtastung	14
2.4.3.2 Signal-Rausch-Verhältnis	16
2.4.3.3 Radiometrische Abtastung	16
3 Optische Fernerkundung von Vegetation	19
3.1 Reflexion von Vegetation	19
3.1.1 Einflüsse auf Blattebene	19
3.1.1.1 Blattstruktur	20
3.1.1.2 Blattpigmente	21
3.1.1.3 Blattinhaltsstoffe	22
3.1.2 Einflüsse auf Pflanzen- und Bestandsebene	23
3.2 Modellierung von Blattreflexion	26
3.3 Modellierung von Bestandsreflexion	28
3.3.1 Strahlungstransfermodelle	28

3.3.2	Geometrisch-optische Modelle	30
3.3.3	Computergraphische Modelle	31
3.3.3.1	Raytracing	32
3.3.3.2	Radiosity	34
3.3.4	Fazit	35
3.4	Vegetationsindizes	37
4	Spektrale Simulation – Vom virtuellen Getreidebestand zum sensorspezifischen Reflexionssignal	41
4.1	Simulation bodennaher Bestandsreflexion	41
4.1.1	Aufbau des virtuellen Vegetationsbestandes	42
4.1.1.1	Datengrundlage	42
4.1.1.2	Virtuelle Pflanzenmodelle	45
4.1.1.3	Virtuelles Bodenmodell	49
4.1.1.4	Virtuelles Bestandsmodell	49
4.1.2	Simulation der Bestandsreflexion	51
4.1.3	Validierung des Simulationsmodells	53
4.1.3.1	Reflexionsspektren	54
4.1.3.2	Bedeckungsgrad	55
4.1.3.3	Blattflächenindex	57
4.1.3.4	Fazit	58
4.2	End-to-End Sensorsimulation	58
4.2.1	EnMAP-Simulation	58
4.2.2	Sentinel-2-Simulation	61
5	Analyse und Auswertung zum Einfluss der Bestandsstrukturmerkmale auf BRDF und VIDF	63
5.1	Datenbasis	63
5.1.1	Aufbau einer Datenbank	63
5.1.2	Simulierte Bestände	64
5.2	Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die BRDF	67
5.2.1	Reihenabstand und relative Reihenorientierung	67
5.2.2	Anzahl der Pflanzen pro Reihe und Meter und Anzahl der Triebe pro Pflanze	72
5.2.3	Einfluss des Bodens	72
5.2.4	Einfluss bei unterschiedlichen Wachstumsstadien	74
5.2.5	Fazit	74
5.3	Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die VIDF	75
5.3.1	Die verschiedenen VIDFs	75
5.3.2	Reihenabstand und relative Reihenorientierung	77
5.3.3	Anzahl der Pflanzen pro Reihe und Meter und Anzahl der Triebe pro Pflanze	79
5.3.4	Einfluss bei unterschiedlichen Wachstumsstadien	82
5.3.5	Fazit	83

6	Entwicklung einer Ableitungsfunktion zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen	85
6.1	Datenbasis	86
6.2	Entwicklung einer Transformationsfunktion	87
6.2.1	Polynomflächenapproximation	87
6.2.2	Schrittweise Polynomkurvenapproximation	89
6.2.3	Ergebnisse der Approximation	90
6.2.3.1	Polynomflächenapproximation	90
6.2.3.2	Schrittweise Polynomkurvenapproximation	94
6.2.3.3	Fazit	97
6.2.4	Bestimmung der Transformationsfunktion	97
6.2.5	Ergebnisse der Nadirwertbestimmung	98
6.2.5.1	Nadirwertbestimmung mit Hilfe der Polynomflächenapproximation	99
6.2.5.2	Nadirwertbestimmung mit Hilfe der schrittweisen Polynomkurvenapproximation	101
6.2.5.3	Fazit	102
6.3	Anwendung der Transformationsfunktion zur Bestimmung des Blattflächenindex	104
6.3.1	Ergebnisse	104
6.3.2	Fazit	106
7	Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	113
	Anhang A: Beobachtungspositionen	129
	Anhang B: Datenvisualisierung	131
	Dank	177
	Eidesstattliche Erklärung	178

Abbildungsverzeichnis

1.1	Spektrale Signatur von Vegetationsbeständen unter verschiedenen Beobachtungswinkeln	3
2.1	Die extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Sonne	6
2.2	Transmission und Absorption der Atmosphäre im optisch-reflektiven Bereich der Strahlung	7
2.3	Die vom Sensor empfangenen Strahlungskomponenten	8
2.4	Reflexionsarten	10
2.5	Die Geometrie der Reflexionsfunktion	13
2.6	Normalisierte SRF zur Simulation von schmalen und breiten Bändern	15
2.7	Kenngrößen der spektralen Abtastung	15
2.8	Die spektralen Bänder einiger bekannter multispektraler und hyperspektraler Satellitensensoren	16
3.1	Spektrales Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsvermögen eines vitalen Laubblattes	20
3.2	Schematische Darstellung der Struktur eines Laubblattes	22
3.3	Absorptionsvermögen ausgewählter Blattpigmente	23
3.4	Absorptions- und Reflexionsvermögen diverser Blattinhaltsstoffe im Vergleich mit dem Reflexionsvermögen eines vitalen und eines trockenen Laubblattes	24
3.5	Der Effekt von mehreren Blattschichten auf das Reflexionsvermögen	25
3.6	BRDF eines Vegetationsbestandes	27
3.7	Anisotrope Reflexionseffekte eines Roggenbestandes	27
3.8	Schematische Darstellung des Trüben-Medium-Ansatzes	28
3.9	Geometrie eines beleuchteten Kegels und die daraus resultierenden Schattenflächen (nach Li und Strahler, 1985).	31
3.10	Kugelszene mit MCRT	33
3.11	Vergleich der Bestandsdarstellung der verschiedenen Ansätze zur Simulation von Vegetationsbestandsreflexion	36
4.1	Flussdiagramm der spektralen Simulation von bodennaher Bestandsreflexion	42
4.2	Pflanzen- und Bestandsmerkmale	44
4.3	3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien für Wintergerste	46
4.4	3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien für Winterroggen	47
4.5	3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien für Winterweizen	48
4.6	Boden-DGM mit charakteristischen Reihen und körniger Oberfläche	49
4.7	Parameter zur Charakterisierung eines virtuellen Bestandsmodells	50
4.8	Modellierter Winterroggenbestand im Wachstumsstadium 5	52
4.9	Beispiele für die Kategorien der Übereinstimmungen der spektralen Validation	54
4.10	Vergleich der Bestände zwischen zwei realen und modellierten Beständen	56

4.11	Vergleich des Bedeckungsgrades für die verschiedenen Wachstumsstadien zwischen in situ gemessenen und modellierten Beständen	56
4.12	LAI-Werte für die verschiedenen Wachstumsstadien der modellierten Bestände	57
4.13	Saisonal typische Trendkurven des LAI von Weizenbeständen	57
4.14	FWHM und SSI der beiden EnMAP-Detektoren	59
4.15	Zwischenprodukte der spektralen EnMAP-Simulation	60
4.16	Spektrale Bänder von Sentinel-2	61
5.1	Beobachtungspositionen auf der Hemisphäre über dem Ziel	64
5.2	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände	65
5.3	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände	66
5.4	Querschnitt entlang der Hauptebene der BRDF bei $\lambda = 670$ nm und bei $\lambda = 800$ nm von 36 simulierten Wintergerste-Beständen im Wachstumsstadium 4 und 6	68
5.5	ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände	69
5.6	BRF- und ANIF-Werte bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände	71
5.7	ANIF-Werte für ein Bodenmodell mit mittlerem RA und einer RRO von 30° , 60° und 90°	73
5.8	ANIF-Werte für ein Bodenmodell mit RRO = 60° und weitem, mittlerem und engem RA	73
5.9	Querschnitt entlang der Hauptebene der VIDF von MSR, MSAVI, RDVI und NDVI aller simulierten WB04-Bestände	76
5.10	VIDF von MSR, MSAVI, RDVI und NDVI eines Wintergerstebestandes mit mittlerem Reihenabstand	77
5.11	Einfluss des Reihenabstandes und der relativen Reihenorientierung auf die VIDF des NDVI in 2D und 3D	79
5.12	VIDF des MSR, MSAVI, RDVI und des NDVI für WB04-Bestände mit unterschiedlichem Reihenabstand	80
5.13	Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VIDF des MSAVI aller simulierten WB04-Bestände	81
5.14	Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VIDF des NDVI aller simulierten WB04-Bestände	82
6.1	Darstellung der Original-VIDF, der approximierten Fläche mit einem Flächenpolynom 6. Grades sowie der Differenz der beiden Flächen des RDVI	88
6.2	Visualisierung der schrittweisen Polynomapproximation	89
6.3	Vergleich des gemittelten Bestimmtheitsmaßes sowie des Genauigkeitsfaktors normiert mit $VI_{max} - VI_{min}$ für Polynome der Polynomflächenapproximation	91
6.4	Querschnitt entlang der Hauptebene der VIDF des RDVI und des NDVI für Wintergerstebestände mit mittlerem Reihenabstand und einer relativen Reihenorientierung von 90°	93
6.5	Vergleich des gemittelten RMSE bei der Polynomflächenapproximation für die VIDFs des DVI und des NDVI generiert aus EnMAP- und Sentinel-2-Daten	93

6.6	Vergleich des gemittelten Bestimmtheitsmaßes sowie des Genauigkeitsfaktors normiert mit $VI_{max} - VI_{min}$ für Polynome der schrittweisen Polynomkurvenapproximation	94
B.1	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 3 . .	132
B.2	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 3 . .	133
B.3	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 3	134
B.4	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 3	135
B.5	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 4 . .	136
B.6	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 4 . .	137
B.7	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 4	138
B.8	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 4	139
B.9	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 5 . .	140
B.10	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 5 . .	141
B.11	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 5	142
B.12	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 5	143
B.13	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 6 . .	144
B.14	Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 6 . .	145
B.15	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 6	146
B.16	Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände im Wachstumsstadium 6	147
B.17	ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	148

B.18 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	149
B.19 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WR04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	150
B.20 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WR04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	151
B.21 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WW04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	152
B.22 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WW04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	153
B.23 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	154
B.24 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	155
B.25 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WR04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	156
B.26 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WR04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	157
B.27 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WW04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	158
B.28 ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WW04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	159
B.29 VIDF von SR für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA. .	160
B.30 VIDF von SR für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM). . . .	161
B.31 VIDF von MSR für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	162
B.32 VIDF von MSR für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM). . . .	163
B.33 VIDF von OSAVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	164
B.34 VIDF von OSAVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM). .	165

B.35 VIDF von MSAVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	166
B.36 VIDF von MSAVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	167
B.37 VIDF von DVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	168
B.38 VIDF von DVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	169
B.39 VIDF von RDVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	170
B.40 VIDF von RDVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	171
B.41 VIDF von NDVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	172
B.42 VIDF von NDVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	173
B.43 VIDF von WDRVI für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.	174
B.44 VIDF von WDRVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).	175

Tabellenverzeichnis

2.1	Beziehung und Terminologie von einfallender und reflektierter Strahlung zur Beschreibung der verschiedenen Reflexionsgrößen	12
4.1	Ergebnisse des Vergleichs zwischen modellierten Bestandsreflexionen und im Feld gemessenen	55
5.1	Einfluss des Reihenabstandes auf die BRDF der verschiedenen Bestände der drei Getreidearten	70
5.2	Lage des Minimums und des Maximums der untersuchten VIDFs	76
5.3	Einfluss des Reihenabstandes auf die VIDF der verschiedenen Bestände der drei Getreidearten	78
6.1	Übersicht zu den in diesem Kapitel untersuchten Fällen	86
6.2	Bestimmtheitsmaß der Polynomflächenapproximation 6. Grades für alle untersuchten Fälle	91
6.3	Bestimmtheitsmaß der schrittweisen Polynomkurvenapproximation für alle untersuchten Fälle	95
6.4	Vergleich des RMSE der beiden Approximationsmethoden	96
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der Polynomflächenapproximation	100
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der schrittweisen Polynomkurvenapproximation	101
6.7	Verbesserung des RMSE der Nadirwertbestimmung der schrittweisen Polynomkurvenapproximation gegenüber der Polynomflächenapproximation	103
6.8	Ergebnisse der Schätzung des Blattflächenindex	105

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
AMAP	botAnique et bioInforMatique de l'Architecture des Plantes
AMAPsim	Software basierend auf AMAP zur Modellierung von 3D-Pflanzen
Anh.	Anhang
ANIF	Anisotropiefaktor (engl. <i>anisotropy factor</i>)
AOT	optische Dicke der Aerosole (engl. <i>aerosol optical thickness</i>)
BOA	bodennah (engl. <i>bottom of atmosphere</i>)
BRDF	Reflexionsfunktion (engl. <i>bidirectional reflection distribution function</i>)
BRF	bidirektionaler Reflexionsfaktor (engl. <i>bidirectional reflectance factor</i>)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAI	Cellulose Absorption Index
cm ²	Kubikzentimeter
CWV	Wasserdampfgehalt (engl. <i>columnar water vapour</i>)
d.h.	das heißt
DGM	digitales Geländemodell
DGMs	digitale Geländemodelle
DN	Grauwert (engl. <i>digital number</i>)
Drat	<i>advanced radiometric ray tracer</i>
dRE	lokales Maximum der ersten Ableitung im Bereich der <i>Red-Edge</i> der Reflexionskurve
DVI	Differenzvegetationsindex (engl. <i>difference vegetation index</i>)
engl.	englisch
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
et al.	Latein: und andere
FOV	Blickfeld (engl. <i>field of view</i>)
FWHM	Halbwertsbreite (engl. <i>full width of half maximum</i>)
g	Gramm
Gl.	Gleichung
GonioExp06	Goniometer Campaign in collaboration with DLR and TU Munich
h	Stunde
IR	Infrarotstrahlung
K	Kelvin
Kap.	Kapitel

Abkürzungsverzeichnis

km	Kilometer
L1	Level 1
L2	Level 2
LAI	Blattflächenindex (engl. <i>leaf area index</i>)
LSN	normalisierte kleinste Quadrate (engl. <i>least square normalised</i>)
LUT	Look-up-Tabelle
m	Meter
mm	Zentimeter
MCRT	Monte-Carlo-Raytracing
MESZ	mitteleuropäische Sommerzeit
Mio.	Million
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
Mrd.	Milliarde
MSAVI	modifizierter bodenbereinigter Vegetationsindex (engl. <i>modified soil adjusted vegetation index</i>)
MSR	modifizierter Ratiovegetationsindex (engl. <i>modified simple ratio</i>)
NDVI	normalisierter Differenzvegetationsindex (engl. <i>normalized difference vegetation index</i>)
NER	rauschäquivalentes Signal (engl. <i>noise equivalent radiance</i>)
NIR	nahes Infrarot
nm	Nanometer
NN	Normal Null
O-H-Bindung	Sauerstoff-Wasserstoff-Bindung
PC	Bedeckungsgrad (engl. <i>percentage cover</i>)
PO	Polynomordnung
PPM	Pflanzen pro Meter
RA	Reihenabstand
RDVI	renormalisierter Differenzvegetationsindex (engl. <i>renormalized difference vegetation index</i>)
RII	Integralindex der Reflexionskurve (engl. <i>reflectance integral index</i>)
RMSE	mittlerer quadratischer Fehler (engl. <i>root mean square error</i>)
RRO	relative Reihenorientierung zur Sonne
RSL	Remote Sensing Laboratories
SAVI	bodenbereinigter Vegetationsindex (engl. <i>soil adjusted vegetation index</i>)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl. <i>signal-to-noise-ratio</i>)
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
SR	Ratiovegetationsindex (engl. <i>simple ratio</i>)
SRF	spektrale Empfindlichkeit (engl. <i>spectral response function</i>)
SSI	spektrales Abtastintervall (engl. <i>spectral sampling distance</i>)
SWIR	Short Wave Infrared
Tab.	Tabelle
TOA	oberhalb der Atmosphäre (engl. <i>top of atmosphere</i>)
TPP	Triebe pro Pflanze
u.a.	und andere
UV	ultraviolette Strahlung
vgl.	vergleiche

VI	Vegetationsindex
VIDF	Vegetationsindexverteilungsfunktion (engl. <i>vegetation index distribution function</i>)
VIDFs	Vegetationsindexverteilungsfunktionen
VIS	sichtbare Strahlung (engl. <i>visual radiance</i>)
VI _s	Vegetationsindizes
VNIR	sichtbare und nahe Infrarotbereich (engl. <i>visual and near infrared</i>)
WB	Wintergerste
WDRVI	Vegetationsindex mit breitem und dynamischen Wertebereich (engl. <i>wide dynamic range vegetation index</i>)
WR	Winterroggen
WS	Wachstumsstadium
WW	Winterweizen
z.B.	zum Beispiel

Formelverzeichnis

α	Absorptionsgrad
α_λ	spektraler Absorptionsgrad
A	Fläche
A_i	die Fläche von i
a_i	verstärktes Signal von Band i
dA_s	Fläche der Sonnenscheibe
ACC	Genauigkeitsfaktor
ACC_{1D}	Genauigkeitsfaktor für die Polynomkurvenapproximation
ACC_{2D}	Genauigkeitsfaktor für die Polynomflächenapproximation
B_i	die gesamte abgegebene Strahlung der Fläche i
B_j	die gesamte abgegebene Strahlung der Fläche j
c	Lichtgeschwindigkeit
C_{LSN}	Kostenfunktion mittels normalisierter kleinster Quadrate
D	Entfernung zwischen Erde und Sonne
DN_i	Grauwert von Band i
E	Bestrahlungsstärke
E_λ^0	Extraterrestrische spektrale Einstrahlung
E_λ^{dir}	direkte spektrale Einstrahlung
E_i	die von der Fläche i emittierte Strahlung
e_i	elektrisches Signal von Band i
$F_{dA_j \rightarrow dA_i}$	Formfaktor zwischen Fläche dA_j und dA_i
F_{ji}	Formfaktor zwischen Fläche j und i
f_r	Reflexionsfunktion (engl. <i>bidirectional reflection distribution function</i>)
θ	Zenitwinkel
θ_{EnMAP}	Zenitwinkel der EnMAP-Aufnahme
θ_i	Zenitwinkel der Beleuchtungsrichtung
θ_n	Winkel zwischen Zenit der Einstrahlrichtung und Flächennormale
θ_r	Zenitwinkel der Reflexionsrichtung
θ_s	Zenitwinkel der Einstrahlrichtung
θ_v	Zenitwinkel der Beobachtungsrichtung
h	Plancksches Wirkungsquantum
h_s	Standardabweichung der Unebenheiten einer Oberfläche
I	Strahlstärke
I_i	die Strahlungsintensität der eintreffenden Strahlung
I_p	die reflektierte Strahlungsintensität im Punkt p
k	Boltzmannkonstante
$\Delta\lambda$	Bandbreite
λ	Wellenlänge
λ_c	Zentrumswellenlänge

L	Strahldichte
L_{λ}^0	diffuses Luftlicht (engl. <i>path radiance</i>)
L_{λ}^{dif}	diffuse Himmelsstrahlung (engl. <i>skylight</i>)
L_{λ}^{dir}	direkte spektrale Ausstrahlung
L_{λ}^{sensor}	am Sensor eintreffende Strahlung
L_e	emittierte Strahldichte
L_i	eintreffende Strahldichte
L_{high}	Strahldichte bei 99 % Reflexionsvermögen
L_{min}	Strahldichte bei 5 % Reflexionsvermögen
L_{ref}	Strahldichte bei 30 % Reflexionsvermögen
M	spezifische Ausstrahlung
M_{λ}	spektrale Ausstrahlung
μ	Mittelwert
n_b	Anzahl der spektralen Bänder
Ω	Raumwinkel
Φ	Strahlungsfluss
$p(x, y, z)$	Punkt p bestimmt durch seine Koordinaten x, y und z
Q	radiometrische Auflösung in Bits pro Pixel
Q	Strahlungsenergie
ρ	Reflexionsgrad
ρ_{λ}	spektraler Reflexionsgrad
ρ_i	diffuser Reflexionsfaktor der Fläche i
ρ_r	mittlerer Reflexionsgrad der Umgebung
R	Reflexionsfaktor
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_{λ}	spektrale Empfindlichkeit (engl. <i>spectral response function</i>)
R_f	im Feld gemessene Reflexion
R_m	modellierte Reflexion
s	sphärische Albedo der Atmosphäre
σ	Standardabweichung
τ	Transmissionsgrad
τ_{λ}	spektraler Transmissionsgrad
τ_i	diffuser Transmissionsfaktor der Fläche i
τ_s	Transmissionsgrad entlang der Einstrahlrichtung
τ_v	Transmissionsgrad entlang der Beobachtungsrichtung
T	Temperatur
ϕ	Azimutwinkel
ϕ_i	Azimutwinkel der Beleuchtungsrichtung
ϕ_{rel}	relativer Azimutwinkel zwischen Einstrahl- und Beobachtungsrichtung
ϕ_r	Azimutwinkel der Reflexionsrichtung
VI_{max}	maximaler VI-Wert
VI_{min}	minimaler VI-Wert
Ω_p	die Gesamtheit aller Winkel der Hemisphäre über Punkt p
$\vec{\omega}_i$	Beleuchtungsrichtung
$\vec{\omega}_{n_x}$	Normalenvektor des Flächenstücks x

$\vec{\omega}_v$	Beobachtungsrichtung
x	Flächenstücks

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Die Domestizierung des Getreides war eine der bedeutendsten Errungenschaften des Menschen. Sie machte ihn unabhängiger in Bezug auf die Nahrungsbeschaffung und sicherte somit sein Überleben. Der Getreideanbau nimmt heute mit 55 % den größten Teil des weltweit genutzten Ackerlandes ein und erbringt somit den Hauptbeitrag zur Ernährung der Menschheit (FAO, 2010). Zur Zeit leben 6,8 Mrd. Menschen auf der Erde. Nach Entwicklungsprognosen des Department of Economic and Social Affairs der Vereinten Nationen wird die Weltbevölkerung im Jahr 2050 bis auf über 9 Mrd. wachsen (DESA, 2009). Während die Zahl der Menschen stetig wächst, sind die globalen Ressourcen wie die landwirtschaftlich nutzbare Fläche hingegen begrenzt. Es ist also von globalem Interesse, die vorhandenen Flächen sowohl effektiver als auch durch nachhaltige Landwirtschaft schonender zu nutzen.

Ein Beitrag dazu ist das *Precision Farming*, ein relativ neuartiges Konzept der Agrarwirtschaft, welches die kleinräumige Variabilität natürlicher Wachstumsbedingungen und aktueller Zustände landwirtschaftlicher Nutzflächen bei der Bewirtschaftung berücksichtigt. Die Bewirtschaftung innerhalb eines Ackerschlags wird demzufolge nicht einheitlich durchgeführt, sondern an die jeweiligen lokal wechselnden Gegebenheiten angepasst. Kleinräumige Unterschiede der Wachstumsbedingungen unterliegen dabei verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel Bodenart, Relief, Wasserversorgung, Nährstoffvorrat oder Dichte des Bestandes und werden bei den pflanzenbaulichen Maßnahmen berücksichtigt. Das räumlich differenzierte Ausbringen von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie die Nutzung minimaler Bewirtschaftungswege ermöglichen so, den Ertrag zu erhöhen und gleichzeitig Umweltbelastungen zu verringern (Doluschitz und Laudien, 2005; Hüter und Klöble, 2005; Jarmer et al., 2003).

Zur Erfassung und zum Monitoring der Teilflächenvariabilität werden flächenhafte Informationen zu den Standortfaktoren und den Bestandsparametern benötigt. Hier bietet die Fernerkundung die Möglichkeit, Informationen flächenhaft und berührungslos zu erfassen und zu analysieren. Somit lassen sich wichtige Informationen über Bestandszustand und -entwicklung ableiten, die gleichzeitig der Kontrolle der pflanzenbaulichen Maßnahmen dienen und eine effektivere Bewirtschaftung unterstützen (Hüter und Klöble, 2005). Vitalität und Produktivität eines Vegetationsbestandes sind durch seine Photosyntheseleistung und Evapotranspiration bestimmt. Beides sind Prozesse, die direkt mit der vorhandenen aktiven Blattfläche und dem Pigmentgehalt (Chlorophyll, Carotinoide, u.a.) in den Blättern im Zusammenhang stehen. Solche Bestandsparameter können aus optischen Fernerkundungsdaten abgeleitet werden, da diese die spektrale Signatur des Bestandes wesentlich beeinflussen (Barret et al., 2000; Jarmer et al., 2003; Hatfield et al., 2008).

Schon seit Jahrzehnten werden Forschungen zur quantitativen Schätzung von Vegetationsbestandsparametern aus optischen Fernerkundungsdaten betrieben. Sehr früh wurden erste

Schätzverfahren auf der Grundlage empirischer Beziehungen zwischen spektralen Indizes und Bestandsparametern entwickelt (z.B. Jordan, 1969 und Tucker, 1977). Bis heute wurde eine Vielzahl solcher meist auf dem Reflexionsvermögen im Rot- und nahen Infrarotbereich (engl. *near infrared*, NIR) basierenden Vegetationsindizes entwickelt (z.B. Deering, 1978; Huete, 1988 und Baret et al., 1989), um vor allem strukturelle Bestandsparameter (z.B. Blattflächenindex, Vegetationsbedeckung und Biomasse) abzuleiten. Viele dieser Vegetationsindizes sind gegenwärtig weit verbreitet und werden zum operationellen *Monitoring* (z.B. Metternicht, 2003 und BMELV, 2004), zur *Change Detection* (z.B. Lyon et al., 1998) und zur Klassifikation eingesetzt (z.B. Itzerott und Kaden, 2007).

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Daten abbildender Spektrometer haben sich die Möglichkeiten der optischen Vegetationsfernerkundung wesentlich erweitert. Neben den klassischen Bestandsparametern lassen sich auch biochemische (z.B. Blattpigmentgehalt, Wassergehalt und Stickstoffgehalt) und biophysikalische Parameter (z.B. Primärproduktion und Fluoreszenz) bestimmen. Die gegenwärtig verfügbaren Daten stammen dabei fast ausschließlich von flugzeuggetragenen Sensoren, mit denen nur jeweils ein kleiner Ausschnitt der Erdoberfläche erfasst werden kann. Neueste Entwicklungen werden eine höhere Verfügbarkeit an Hyperspektraldaten satellitengetragener Sensoren ermöglichen, deren Vorteil vor allem in der kontinuierlichen Datenaufnahme und der großen Abdeckung liegt. Eine dieser neuen Entwicklungen ist EnMAP (*Environmental Mapping and Analysis Program*), eine deutsche hyperspektrale Satellitenmission, deren Start im Frühjahr 2015 vorgesehen ist. Einer der Forschungsschwerpunkte der EnMAP-Mission ist auf die Landwirtschaft gerichtet und hier im speziellen auf das *Precision Farming* (Kaufmann et al., 2008; Sang et al., 2008; Segl et al., 2010). Mit einer räumlichen Auflösung von 30 m (bei 30 km Schwadbreite), einer spektralen Auflösung von 6,5 nm (im sichtbaren und nahen Infrarotbereich) bzw. 10 nm (im kurzwelligen Infrarotbereich) und einer Wiederkehrrate von maximal 4 Tagen bietet EnMAP optimale Voraussetzungen für ein *Monitoring* von Agrarflächen. Die hohe zeitliche Auflösung trotz der geringen Schwadbreite wird durch stufenloses Schwenken um bis zu $\pm 30^\circ$ quer zur Flugrichtung erreicht. Daraus resultiert, dass die Daten durch variierende Ein- und Ausstrahlungsgeometrien sowie variierende Sonnenstände beeinflusst sind. Um diese Einflüsse identifizieren und korrigieren zu können, ist die Kenntnis der bidirektionalen Reflexionsfunktion (engl. *bidirectional reflectance distribution function*, BRDF) der beobachteten Oberflächen notwendig. Bei der Beobachtung von Vegetationsbeständen bedeutet das, dass unterschiedliche Beobachtungsrichtungen auch unterschiedliche spektrale Signaturen liefern, da jeweils ein anderes Verhältnis an Boden- und Vegetationsfläche sowie beleuchteter und beschatteter Fläche aufgenommen wird (siehe auch Abb. 1.1). Dieser Effekt muss korrigiert werden, um die natürliche Variation des Vegetationszustandes beobachten zu können.

Es gibt bereits eine Reihe von Arbeiten zum Verständnis und zur Simulation bidirektionaler Reflexion von Vegetationsbeständen. Eine gute Zusammenfassung findet sich in Goel (1988) und Liang (2004). So genannte Strahlungstransfermodelle berechnen basierend auf physikalischen Prinzipien das bidirektionale Reflexionsvermögen von Vegetationsbeständen in Abhängigkeit von der Beobachtungs- und Beleuchtungsgeometrie und ermöglichen so parameterabhängig die Einflüsse zu bestimmen. Die vorliegende Arbeit soll an die Untersuchungen zum Verständnis der BRDF von Vegetationsbeständen, im speziellen von Getreidebeständen, anknüpfen und darüber hinaus den Einfluss der BRDF auf die Berechnung von Vegetationsindizes (VIs) untersuchen. Im Hinblick auf die EnMAP-Mission liegt das Ziel der Arbeit

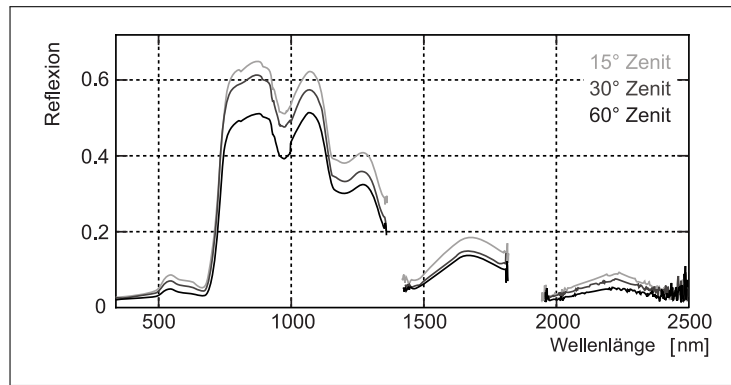


Abb. 1.1 – Spektrale Signatur von Vegetationsbeständen unter verschiedenen Beobachtungswinkeln. Daten der GonioExp06 Kampagne des RSL der Universität Zürich (Schneider et al., 2007).

auf der Entwicklung einer Korrekturmöglichkeit der verschiedenen Beobachtungsgeometrien für operationell verwendete VIs. Eine derartige Korrektur würde eine verbesserte Charakterisierung von Vegetationsbeständen hinsichtlich ihrer Vitalität und Produktivität mittels Fernerkundungsdaten (speziell mittels EnMAP-Daten) ermöglichen und kann somit einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen und effektiven Landwirtschaft leisten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei große Blöcke. In den ersten beiden Kapiteln (Kap. 2 und 3) werden die grundlegenden Sachverhalte und Methoden vorgestellt auf denen diese Arbeit basiert. Im zweiten Block (Kap. 4) wird die Entwicklung eines Systems zur Simulation von realitätsnahen Schrägblickbeobachtungen von Vegetationsbeständen beschrieben. Der dritte Block (Kap. 5, 6 und 7) beschreibt die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen.

Im Einzelnen beinhaltet Kap. 2 die für die Arbeit notwendigen Grundlagen der Spektroskopie. Dazu zählen die grundlegenden Strahlungsgesetze, ausgewählte Aspekte der Strahlungsinteraktion in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche sowie die Terminologie bei der Reflexion. Anschließend werden die Aufnahmeprinzipien und Kenngrößen abbildender Spektrometer beschrieben.

In Kap. 3 werden die spektralen Charakteristika von Vegetation umfassend beschrieben. Nachfolgend werden die verschiedenen Möglichkeiten der Modellierung von Bestandsreflexion vorgestellt und die für diese Arbeit geeignetste Möglichkeit erörtert. Abschließend wird kurz auf Vegetationsindizes eingegangen und die in dieser Arbeit genutzten vorgestellt.

Die spektrale Simulation ist Thema des 4. Kapitels. Hier wird die Entwicklung eines Simulationssystems vorgestellt, mit dem realitäts- und bodennahe Bestandsreflexionen aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen von virtuellen Getreidebeständen modelliert werden können. Anschließend wird für EnMAP und zum Vergleich für Sentinel-2 gezeigt, wie die bodennahen Reflexionsspektren in sensorspezifische Reflexionsspektren mittels einer End-to-

1 Einleitung

End-Simulation umgewandelt werden können.

In Kap. 5 wird das vorgestellte Simulationssystem genutzt, um am Beispiel von virtuellen Getreidebeständen (Wintergerste, Winterroggen, Winterweizen) die verschiedenen Einflüsse der Bestandsstruktur auf Reflexionssignale unterschiedlicher Beobachtungsrichtungen sowie auf daraus abgeleitete Vegetationsindizes zu untersuchen.

In Kap. 6 werden die aus dem vorherigen Kapitel gewonnen Erkenntnisse genutzt, um eine Funktion zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes zu entwickeln. Anschließend wird am Beispiel der in Kap. 4 vorgestellten simulierten Reflexionsspektren von virtuellen Getreidebeständen und auf Basis der im vorangegangenen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse eine Methode vorgestellt, mit der der Nadirwert eines Vegetationsindex aus einer Schrägblickbeobachtung bestimmt werden kann. Abschließend wird die entwickelte Transformationsfunktion genutzt, um am Beispiel des Blattflächenindex eine empirische Schätzung durchzuführen.

Die Arbeit wird mit einer zusammenfassenden Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse in Kap. 7 abgeschlossen. Dabei wird auch ein Ausblick zu Erweiterungen der vorgestellten Methodik und weiteren Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Der Anhang beinhaltet zum einen zusätzliche Informationen (Anh. A) zur Arbeit und zum anderen die Visualisierung sämtlicher erzeugter Datenbestände aus den Untersuchungen der Einflüsse der Bestandsstruktur auf die bidirektionale Reflexions- und Vegetationsindexfunktion (Anh. B und C) sowie der Entwicklung der Transformationsfunktion (Anh. B und C). Der dritte Teil des Anhangs (Anh. C) ist eine Daten-DVD mit sämtlichen in der Arbeit genutzten Daten, während der Arbeit entwickelter Software und erzeugten Ergebnissen.

2 Spektroskopie

Im folgenden Kapitel werden zum besseren Verständnis der Arbeit, speziell der Teilthematik der spektralen Sensorsimulation, die wesentlichen Grundlagen der abbildenden Spektroskopie, auch hyperspektrale Fernerkundung genannt, vermittelt. Dazu gehören die physikalischen Grundlagen des Strahlungsflusses, die spektralen Charakteristika von Oberflächenmaterialien sowie die Funktionsweise abbildender Spektrometer. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Strahlungstransfer von der Sonne zur Erdoberfläche und zurück zum Sensor. Auf eine allgemeine Einleitung in die Fernerkundung wird an dieser Stelle verzichtet und statt dessen auf entsprechende Lehrbücher (z.B. Kraus und Schneider, 1988; Schowengerdt, 1997; Campbell, 2002; Richards und Jia, 2005; Albertz, 2007 und Lillesand et al., 2008) verwiesen. Für detaillierte Herleitungen und ausführliche Erläuterungen, dieses Kapitel betreffend, sei auf weiterführende Literatur wie Richards und Jia (2005), Schowengerdt (1997) und Kraus und Schneider (1988) verwiesen.

2.1 Physikalische Grundlagen

Bei der Spektroskopie, wie auch bei der optischen Fernerkundung, wird die Intensität der von einer Oberfläche reflektierten, transmittierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen. Das dabei kontinuierlich aufgezeichnete Signal, auch Spektrum oder spektrale Signatur genannt, enthält Informationen zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Materialien sowie zu physikalischen Prozessen, die während der Messung abgelaufen sind.

2.1.1 Strahlungsquelle

Die typische Strahlungsquelle bei der optischen Erdbeobachtung ist die Sonne. Sie entspricht nahezu einem idealen Strahler, auch Schwarzkörper genannt. Die Ausstrahlung M_λ der Sonne erfolgt wie für jeden idealen Strahler gemäß ihrer Temperatur T und kann mit dem Planckschen Strahlungsgesetz als Funktion der Wellenlänge wie folgt beschrieben werden:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right] \quad (2.1)$$

Plancksches Wirkungsquantum $h = 6,62606896 * 10^{-34} \text{ Js}$

Boltzmannkonstante $k = 1,3806504 * 10^{-23} \frac{J}{K}$

Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792458 * 10^8 \frac{m}{s}$.

Neben der von der Sonne ausgesendeten Strahlung interessiert vor allem der Anteil, der die Erde erreicht, die extraterrestrische spektrale Einstrahlung E_λ^0 . Die von der Sonne in den Weltraum abgegebene Strahlung erfährt eine Abschwächung mit dem Quadrat der Entfernung. Die spektrale extraterrestrische Einstrahlung oberhalb der Erdatmosphäre ergibt sich

2 Spektroskopie

demnach wie folgt:

$$E_{\lambda}^0 = \frac{M_{\lambda} dA_s}{D^2} \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right] , \quad (2.2)$$

wobei dA_s der Fläche der Sonnenscheibe und D ($1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$) der Entfernung zwischen Sonne und Erde entspricht.

2.1.2 Atmosphäre

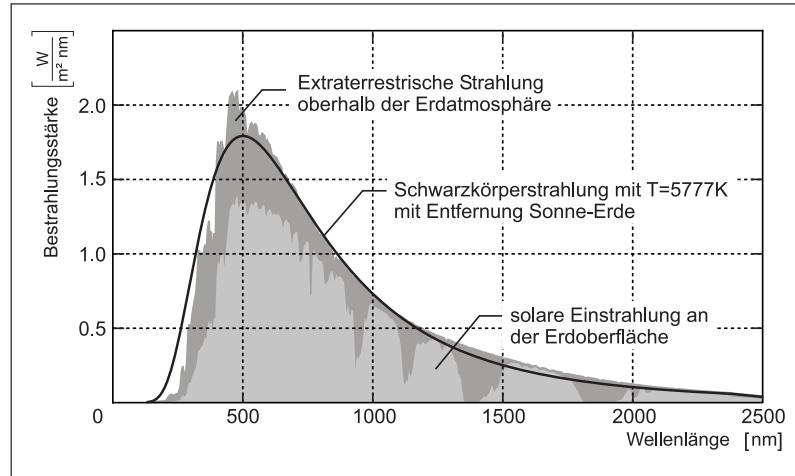


Abb. 2.1 – Die extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Sonne (Daten von Thuillier et al. (2003)) im Vergleich mit der Bestrahlungsstärke eines Schwarzkörpers mit einer Temperatur von 5777 K bei gleicher Entfernung zur Sonne, sowie solare Einstrahlung nahe der Erdoberfläche (modelliert mit Guanter et al. (2009), basierend auf MODTRAN4 von Berk et al. (2003)).

Die an der Erde ankommende extraterrestrische Strahlung erreicht zunächst die oberen Schichten der Atmosphäre, wo ein Teil zurück in den Weltraum reflektiert wird. Der andere Teil durchquert die Atmosphäre und unterliegt dabei verschiedenen wellenlängenabhängigen Prozessen. Die Strahlung wird aufgrund der gas- und partikelförmigen Bestandteile (z.B. Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf, Ozon, Kohlendioxid und Aerosole) je nach Konzentration absorbiert und gestreut. Diesen Prozess der Strahlungsabschwächung innerhalb der Atmosphäre nennt man auch Extinktion, quantifiziert durch den Transmissionsgrad der Atmosphäre entlang des Strahlungswegs $\tau_s(\lambda)$. In bestimmten Wellenlängenbereichen absorbiert die Atmosphäre so stark, dass nur sehr wenig oder gar keine Strahlung mehr die Erdoberfläche erreicht. In der Fernerkundung werden somit nur die so genannten atmosphärischen Fenster genutzt, die für die Strahlung weitgehend durchlässigen Wellenlängenbereiche des Spektrums. Abb. 2.2 zeigt die atmosphärische Transmission und Absorption für den in der Spektroskopie genutzten optisch-reflektiven Bereich der Strahlung. Die an der Erdoberfläche ankommende Strahlung, die spektrale Einstrahlung E_{λ}^{dir} , ergibt sich wie folgt:

$$E_{\lambda}^{dir} = \tau_s(\theta_s, \lambda) E_{\lambda}^0 \cos \theta_s , \quad (2.3)$$

wobei θ_s den Zenitwinkel der Einstrahlrichtung angibt.

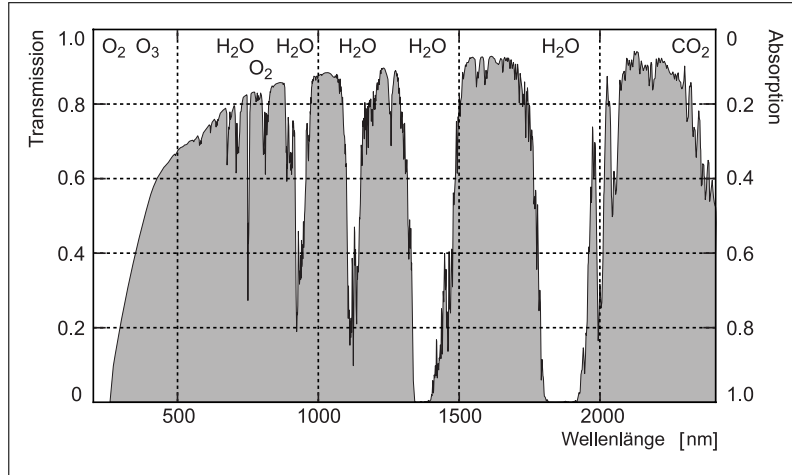


Abb. 2.2 – Transmission und Absorption der Atmosphäre im optisch-reflektiven Bereich der Strahlung. Es ist jeweils das Gas das die Absorptionsbande verursacht dargestellt (modelliert mit Guanter et al., 2009, basierend auf MODTRAN4 von Berk et al., 2003).

Auf der Erdoberfläche trifft die Strahlung schließlich auf das beobachtete Objekt und wird zum Teil reflektiert, absorbiert oder auch transmittiert. Der reflektierte Teil der Strahlung verlässt das Objekt als gerichtete spektrale Ausstrahlung L_{λ}^{dir} , modifiziert durch die spektralen Charakteristika (Reflexionsgrad ρ) des Objekts:

$$L_{\lambda}^{dir} = \rho(\lambda) \frac{E_{\lambda}^{dir}}{\pi} . \quad (2.4)$$

2.1.3 Strahlungskomponenten

Die am Sensor empfangene Strahlung L_{λ}^{sensor} beinhaltet die vom beobachteten Objekt reflektierte direkt einfallende Strahlung L_{λ}^{dir} , die vom beobachteten Objekt reflektierte diffuse Himmelsstrahlung L_{λ}^{dif} und die durch atmosphärische Streuung verursachte Strahlung in Richtung des Sensors L_{λ}^0 (siehe Abb. 2.3). Es ergibt sich somit:

$$L_{\lambda}^{sensor} = L_{\lambda}^{dir} + L_{\lambda}^{dif} + L_{\lambda}^0 \quad (2.5)$$

Neben der direkten solaren Einstrahlung wird das beobachtete Objekt von weiteren Komponenten bestrahlt. Die in der Atmosphäre gestreute Strahlung erreicht zum Teil die Erdoberfläche und bestrahlt als diffuse Himmelsstrahlung E_{λ}^{dif} (engl. *skylight*) das Objekt. Sie kann direkt an der Erdoberfläche gemessen oder mittels Strahlungstransfermodellen (z.B. MODTRAN (Berk et al., 1989)) bestimmt werden. Die Himmelsstrahlung führt unter anderem zu dem Effekt, dass der Himmel blau ist und Schattengebiete ohne direkte Einstrahlung nicht komplett dunkel sind. Ein weiterer Effekt ist die sphärische Albedo der Atmosphäre s . Sie beschreibt den Teil der Strahlung, der von der Atmosphäre zurück zum beobachteten Objekt reflektiert wird, nachdem diese zuvor von dem Objekt aus mittels reflektierter Strahlung (direkter und diffuser Teil) beleuchtet wurde. Die gesamte von dem Objekt reflektierte Strahlung

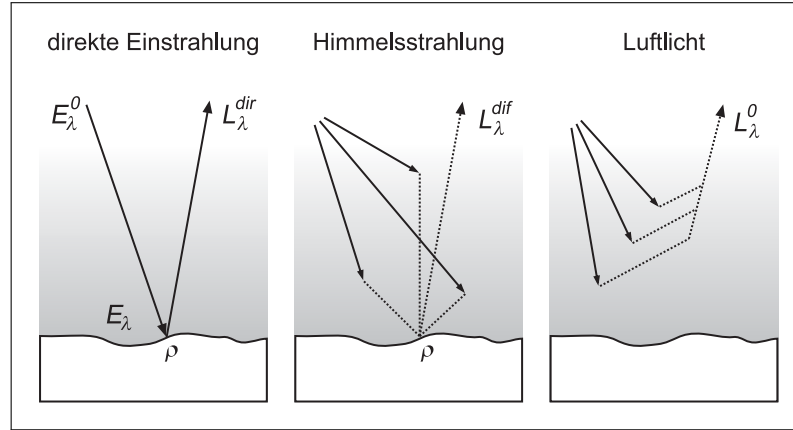


Abb. 2.3 – Die vom Sensor empfangenen Strahlungskomponenten. Verändert nach Schowengerdt (1997).

muss schließlich ein weiteres Mal die Atmosphäre durchqueren und erfährt dabei erneut eine Abschwächung durch den Transmissionsgrad der Atmosphäre entlang des Strahlungswegs τ_v zum Sensor. Neben der vom beobachteten Objekt kommenden Strahlung erreicht auch das sogenannte Luftlicht den Sensor. Das Luftlicht L_λ^0 (engl. *path radiance*) ist der in Richtung des Sensors wirkende Anteil der diffusen Himmelsstrahlung. Es wird durch die Streuprozesse innerhalb der Atmosphäre bestimmt, ist stark wellenlängenabhängig und kann mittels Strahlungstransfermodellen bestimmt werden. Das Luftlicht führt zu einer Trübung der im Sensor gemessenen Signale. Die am Sensor eintreffende Gesamtstrahlung L_λ^{sensor} kann somit wie folgt beschrieben werden:

$$L_\lambda^{sensor} = \frac{\rho}{\pi} \frac{\tau_v(\theta_v, \lambda) (E_\lambda^{dir} + E_\lambda^{dif})}{1 - \rho_{rel}s} + L_\lambda^0(\theta_s, \theta_v, \phi_r) \quad , \quad (2.6)$$

wobei ϕ_r den relativen Azimutwinkel zwischen Einstrahlrichtung und Sensorrichtung und ρ_{rel} den mittleren Reflexionsgrad der Umgebung angibt. Für ρ wird Lambertsche Reflexion angenommen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Atmosphäre das vom Sensor gemessene Signal wesentlich beeinflusst und somit das eigentliche Reflexionssignal des Zielobjekts verändert. Ein Grund dafür ist, dass die Zusammensetzung der Atmosphäre – vor allem der Wasserdampfgehalt ist eine zeitlich und räumlich sehr variable Größe – wetterbedingten und lokalen Einflüssen unterliegt (z.B. urbanes oder rurales Gebiet, Tiefland oder Hochgebirge). Um das Reflexionsvermögen des Zielobjekts zu bestimmen, müssen die Einflüsse der Atmosphäre beseitigt werden. Dazu gibt es eine Reihe von Methoden zur Atmosphärenkorrektur. Die Nutzung von Strahlungstransfermodellen (z.B. MODTRAN von Berk et al., 1989, 6S von Vermote et al., 1997 oder LibRadtran von Mayer und Kylling, 2005) oder empirischer Beziehungen zwischen Sensorsignal und am Boden gemessener Reflexionsspektren (*Empirical Line Methode*) sind derzeit die gängigsten Methoden für hyperspektrale Daten. Die Strahlungstransfermodelle liefern die benötigten atmosphärischen Parameter unter Zuhilfenahme der Abbildungsgeometrie und eines Geländemodells, so dass der Reflexionsgrad ρ pixelweise mittels Gl. 2.6 bestimmt werden kann. Die *Empirical Line Methode* ist gegenüber dem

Ansatz der Strahlungstransfermodellierung eine relativ einfache Methode zur Berechnung des Reflexionsvermögens. Dabei werden für jedes Band Korrekturkoeffizienten aus der Gegenüberstellung von unkorrigierten Bildspektren mit in situ gemessenen Referenzspektren, die während der Befliegung am Boden aufgenommen wurden, errechnet. Meistens werden dafür sehr helle und sehr dunkle Flächen genutzt, die möglichst im gesamten Spektralbereich jeweils sehr hohe bzw. sehr niedrige Reflexionswerte annehmen, um die gesamte im Bild vorkommende Variation der Werte zu berücksichtigen. Mittels dieser Messungen und den entsprechenden Signalen im Bild wird für jedes Band eine lineare Korrekturgleichung (Polynom 1. Grades) aufgestellt auf Grundlage derer die im Sensor gemessene Strahldichte als Reflexionsfaktor abgebildet wird. Im sichtbaren Bereich, besonders im Blauen, ist dieses Verhältnis jedoch nicht linear. Es empfiehlt sich für diesen Bereich mehrere Messungen von Materialien mit unterschiedlichen Reflexionswerten aufzunehmen und eine Korrekturfunktion mit einem Polynom 2. Grades anzuwenden.

2.2 Spektrale Charakteristika

Jedes Objekt auf der Erdoberfläche besitzt spezielle spektrale Charakteristika, eine Tatsache, die die Voraussetzung für die optische Fernerkundung bildet. Diese sind durch die Materialeigenschaften des Objekts bestimmt. Trifft Strahlung auf eine Oberfläche, wird ein Teil reflektiert ($E_{\lambda,r}$), ein Teil absorbiert ($E_{\lambda,a}$) und bei nicht opaken Objekten durchdringt ein Teil der Strahlung das Objekt ($E_{\lambda,t}$). Absorption ist die Energieaufnahme durch einen Stoff. Reflexion bedeutet das Zurückwerfen eintreffender Strahlung, ohne dass dabei Energie aufgenommen oder abgegeben wird. Bei der Transmission durchdringt die Strahlung ein Objekt ohne Energieänderung. Die Energiebilanz für reflektive Wellenlängenbereiche ohne thermische Emission ergibt sich wie folgt:

$$E_{\lambda,i} = E_{\lambda,r} + E_{\lambda,a} + E_{\lambda,t} \quad (2.7)$$

Setzt man diese mit dem Anteil der einfallenden Strahlung $E_{\lambda,i}$ ins Verhältnis (vgl. Gl. 2.8) ergeben sich daraus die maßeinheitslosen Materialeigenschaften (vgl. Gl. 2.9).

$$\frac{E_{\lambda,i}}{E_{\lambda,i}} = \frac{E_{\lambda,r}}{E_{\lambda,i}} + \frac{E_{\lambda,a}}{E_{\lambda,i}} + \frac{E_{\lambda,t}}{E_{\lambda,i}} \quad (2.8)$$

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (2.9)$$

Die Reflexionseigenschaften eines Objektes sind vor allem an dessen Oberflächenbeschaffenheit gebunden. Glatte Oberflächen bewirken zumeist spiegelnde, raue Oberflächen diffuse Reflexion. Ob eine Oberfläche als rau oder glatt wahrgenommen wird, hängt dabei von der Wellenlänge ab. Eine Oberfläche ist für Strahlung glatt, wenn gilt:

$$h_s = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_n} \quad (2.10)$$

Dabei ist h_s die Standardabweichung der Oberflächenunebenheiten und θ_n der Winkel zwi-

schen Flächennormale und dem Zenit der Einstrahlrichtung. Der Idealfall der diffusen Reflexion tritt bei Lambertschen Oberflächen auf, diese reflektieren die eintreffende Strahlung in alle Richtungen gleichmäßig. Die meisten natürlichen Oberflächen reflektieren mit einer Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion, welche auch als komplexe Reflexion bezeichnet wird (vgl. Abb. 2.4). Neben der Oberflächenreflexion kann es zusätzlich aufgrund von Diskontinuitäten innerhalb eines Materials zu Rückstreuungen kommen (Volumenreflexion). Diese Art der Reflexion ist dabei immer diffus.

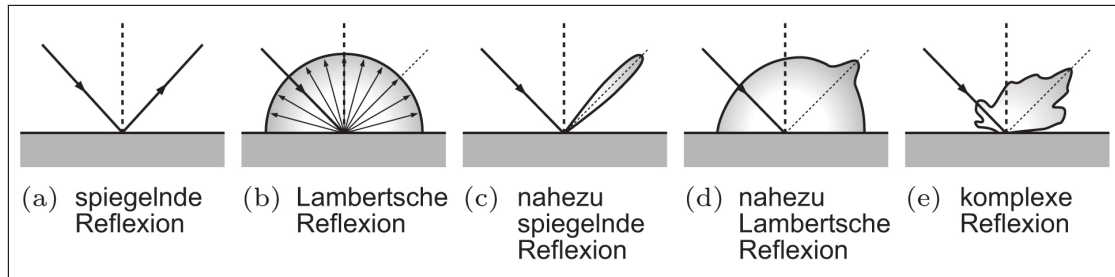


Abb. 2.4 – Reflexionsarten: (a) *spiegelnde Reflexion*, (b) *Lambertsche (diffuse) Reflexion* sowie (c), (d) und (e) *verschiedene Mischformen*.

Der für die optische Fernerkundung bedeutendste Prozess ist die Absorption, welche im Folgenden näher erklärt wird. Auf einem Objekt eintreffende Strahlungsenergie regt Elektronenübergangsprozesse (Transfer auf ein höheres Energieniveau) sowie Schwingungsprozesse (Streck-, Rotations- und Deformationsschwingungen) auf molekularer Ebene an. Dabei wird der eintreffenden Strahlung Energie entzogen, die bei Relaxation des Prozesses wieder abgegeben wird. Diese Energie wird für Prozesse der stofflichen Umsetzung (z.B. Photosynthese) genutzt und führt zur Erwärmung des Objektes, das die Abgabe langwelligerer Strahlung zur Folge hat. Da in Atomen nur diskrete Elektronenniveaus auftreten können und die Anregung von Schwingungsprozessen nur durch Photonen mit bestimmter Energie möglich ist, kann jedem Absorptionsprozess eine bestimmte Wellenlänge zugeordnet werden. Elektronenübergangsprozesse benötigen viel Energie. Die durch sie bewirkten Banden sind deshalb meist recht breit und im kurzwelligen UV-Bereich befindlich, teils mit Ausläufern bis in den visuellen Bereich hinein (z.B. Eisenoxide). Die Schwingungsprozesse bewirken recht schmale Banden im langwelligen IR-Bereich, da ihre Anregung weniger Energie benötigt (van der Meer und de Jong, 2001).

Bei Mineralien und Gesteinen ist die Lage, Form und Tiefe der Absorptionsbanden durch die Kristallgitterstruktur (Schwingungsprozesse) sowie durch die chemische Zusammensetzung (Elektronenübergangsprozesse) bestimmt. Somit können spektrale Charakteristika direkt der mineralogischen Zusammensetzung zugeordnet werden (van der Meer und de Jong, 2001).

Bei Vegetation treten vorwiegend identische Absorptionsmerkmale auf, auch wenn es sich um unterschiedliche Pflanzenarten handelt, denn die der Absorption zugrunde liegenden molekularen Bindungen sind in verschiedenen, in den Pflanzen vorkommenden, Stoffen zu finden (z.B. O-H-Bindung in Wasser, Zellulose und Stärke). Somit ist keine eindeutige Zuordnung zwischen Absorptionsbande und molekularem Prozess möglich. Bis auf die Blattpigmente (z.B. Chlorophyll und Karotinoide) kommen viele der biochemischen Pflanzenstoffe auch nur

in geringen Konzentrationen vor, so dass nur geringe Absorptionsbanden gemessen werden können. Hinzu kommen Mehrfachstreuungsprozesse auf Pflanzen- und Bestandsebene sowie innerhalb der Blätter (im Mesophyll), die die Form der Absorptionsbanden (Verbreiterung) beeinflussen (Kumar et al., 2001).

2.3 Reflexionsgrad, Reflexionsfaktor und Reflexionsfunktion

Der Reflexionsgrad ρ das Verhältnis zwischen reflektierter Strahlung und einfallender Strahlung. Entsprechend dem Energieerhaltungssatz nimmt der Reflexionsgrad stets Werte von 0 bis 1 an. Der Reflexionsfaktor R ist definiert als Verhältnis aus der von einer Oberfläche in eine bestimmte Richtung $d\Omega_r(\theta_r, \phi_r)$ reflektierten Strahlung und der Strahlung, die von einem Lambertschen Reflektor in dieselbe Richtung unter gleichen Beleuchtungsbedingungen reflektiert werden würde (Nicodemus et al., 1977; Schaepman-Strub et al., 2006). Der Reflexionsfaktor kann dabei auch Werte über 1 annehmen, besonders im Fall von stark vorwärts gerichteter Reflexion (nahezu spiegelnd) (Schaepman-Strub et al., 2006).

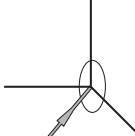
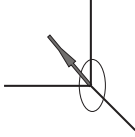
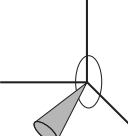
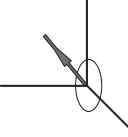
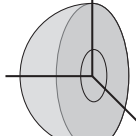
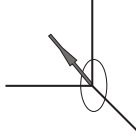
Physikalisch gesehen lassen sich verschiedene Fälle zur Beschreibung des Reflexionsfaktors definieren. Man unterscheidet dabei rein theoretische Fälle von in der Praxis messbaren Fällen. Tab. 2.1 gibt einen Überblick zu allen nach Nicodemus et al. (1977) definierten Fällen. Der bidirektionale Fall (Fall 1) ist dabei der bedeutendste (Schaepman-Strub et al., 2006). Dabei werden infinitesimal kleine Raumwinkel angenommen. In der Praxis sind die Öffnungswinkel der Messinstrumente jedoch endlich groß, so dass einer der konischen bzw. hemisphärischen Fälle (Fall 5, 6, 8 und 9) zutrifft. Der bikonische Fall (Fall 5) z.B. entspricht den typischen Laborbedingungen, wobei ein von einer kollimierten Lichtquelle beleuchtetes Objekt von einem nicht abbildenden Spektrometer gemessen wird. Die konisch-hemisphärische Reflexion (Fall 6) ist ein spezieller im Labor messbarer Fall, bei dem das hemisphärische Signal mit einem Kosinusempfänger aufgenommen wird. Die Messung des hemisphärisch-konischen Reflexionsfaktors (Fall 8) ist der häufigste Fall und entspricht den Messungen von satelliten- und flugzeuggetragenen Sensoren sowie in-situ-Messungen mit einem Feldspektrometer. Die bihemisphärische Reflexion (Fall 9) kann mit einem Albedometer aufgenommen werden. Eine detaillierte Beschreibung aller Fälle sowie deren physikalische Definition findet sich in Nicodemus et al. (1977) und Schaepman-Strub et al. (2006).

Die Reflexionsfunktion für den bidirektionalen Fall (BRDF) beschreibt das Verhältnis aus reflektierter differenzieller Strahlungsdichte dL_r in Beobachtungsrichtung (θ_r, ϕ_r) und einfallender differenzieller Bestrahlungsstärke dE_i , die aus einem Raumwinkel $d\Omega_i$ um die Einfallrichtung (θ_i, ϕ_i) auf die Oberfläche wirkt (Nicodemus et al., 1977; Schaepman-Strub et al., 2006). Sie ist definiert als

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega_i} \left[\frac{1}{sr} \right], \quad (2.11)$$

wobei θ und ϕ Zenit- und Azimutwinkel der einfallenden und reflektierten Strahlung sind. Da die BRDF einer Lambertschen Fläche gleich $1/\pi$ ist, ergibt sich für den bidirektionalen Reflexionsfaktor (engl. *bidirectional reflectance factor*, BRF) $R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ jeder beliebigen Oberfläche (Schaepman-Strub et al., 2006)

Tab. 2.1 – Beziehung und Terminologie von einfallender und reflektierter Strahlung zur Beschreibung der verschiedenen Reflexionsgrößen. Falldefinition nach Nicodemus et al. (1977). Die hervorgehobenen Fälle beschreiben messbare Größen, während die anderen nur rein theoretisch beschrieben werden können. Nach Schaepman-Strub et al. (2006).

Reflektierte Strahlung		Direktional		Konisch		Hemisphärisch	
Einfallende Strahlung							
Direktional	Fall 1 bidirektional			Fall 2 direktional-konisch		Fall 3 direktional-hemisphärisch	
Konisch	Fall 4 konisch-direktional			Fall 5 bikonisch		Fall 6 konisch-hemisphärisch	
Hemisphärisch	Fall 7 hemisphärisch-direktional			Fall 8 hemisphärisch-konisch		Fall 9 bihemisphärisch	

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \pi f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \quad (2.12)$$

Um unterschiedliche Oberflächen miteinander vergleichen zu können, wird der Anisotropiefaktor (engl. *anisotropy factor*, ANIF) berechnet, indem die einzelnen BRF-Messungen mit dem BRF der Nadirrichtung wie folgt normalisiert werden:

$$ANIF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{R_0(\theta_i, \phi_i, 0, 0, \lambda)} \quad (2.13)$$

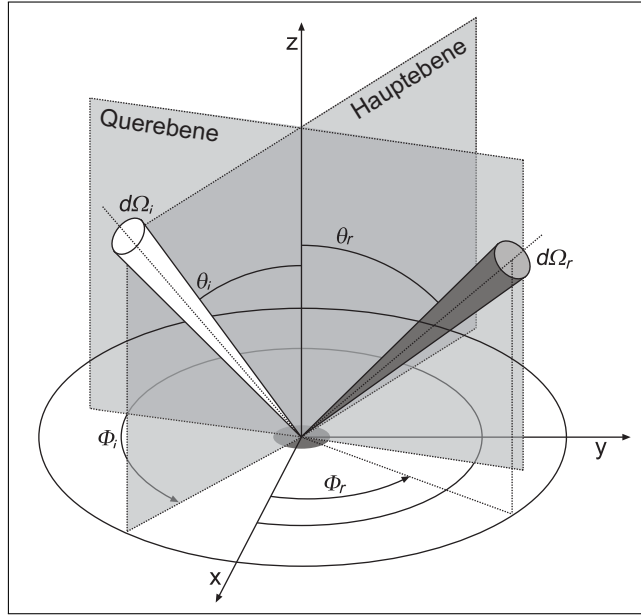


Abb. 2.5 – Die Geometrie der Reflexionsfunktion.

Abb. 2.5 veranschaulicht die Geometrie der Reflexionsfunktion. Die durch Beleuchtungsquelle und Zielobjekt aufgespannte Ebene wird als Hauptebene bezeichnet, die Ebene senkrecht dazu und durch das Zielobjekt verlaufend als Querebene. Der Punkt, an dem Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung identisch sind, wird als *Hotspot* bezeichnet, da in diesem Punkt keine Schatten beobachtet werden können dafür aber der größtmögliche Reflexionsfaktor.

2.4 Abbildende Spektrometer

Abbildende Spektrometer, auch Bildspektrometer genannt, gehören in der optischen Fernerkundung zu den anspruchsvollsten Systemen (Strobl, 2000). Grundsätzlich sind alle abbildenden Spektrometer nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Eine abbildende Optik spaltet und fokussiert die am Sensor eintreffende Strahlung auf den Detektor. Der Detektor konvertiert das optisch empfangene Signal in ein kontinuierlich zeitlich veränderliches, elektronisches Signal, welches anschließend von der Sensorelektronik verstärkt und weiterverarbeitet wird. Im Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) wird das Signal zeitdiskret abgetastet, quantisiert und als Grauwert (engl. *digital number*, DN) wertdiskret abgelegt (Schowengerdt, 1997).

2.4.1 Räumliche Aufnahmeprinzipien

Hinsichtlich des Prinzips der räumlichen Aufnahme lassen sich zwei Arten unterscheiden, das *Whiskbroom*- (*whisk* im Dt. „wischen“) und das *Pushbroomsystem* (*push* im Dt. „schieben, drücken“). Beim *Whiskbroomsystem* gibt es für jeden Spektralkanal genau ein Detektorelement (Zeilendetektor), d.h. es kann immer genau ein Pixel abgetastet werden. Die Scanzeile quer zur Flugrichtung wird durch einen rotierenden Spiegel erzeugt, der noch vor der abbildenden Optik zum Einsatz kommt. Die Scanrichtung entlang der Flugrichtung ergibt sich aus der Fortbewegung des Sensors (flugzeuggetragen oder satellitengetragen). Um das Abtasten quer zur Flugrichtung vor allem wegen der komplizierten Rotationsmechanik und der geringen Integrationszeit zu vermeiden, wurden Scansysteme entwickelt, die eine komplette Bildzeile gleichzeitig aufnehmen können, die *Pushbroomsysteme*. Dafür wurden spezielle Flächendetektoren entwickelt, die in einer Dimension die räumliche Information abbilden und in der anderen die spektralen Kanäle. Die Anzahl der Pixel einer Zeile bzw. die Anzahl der spektralen Kanäle entspricht der Anzahl der Detektorelemente entlang der räumlichen Achse bzw. der spektralen Achse.

2.4.2 Spektrale Aufnahmeprinzipien

Hinsichtlich des spektralen Konzepts lassen sich zwei Arten unterscheiden, Prismenspektrometer und Gitterspektrometer. Sie unterscheiden sich beim Dispersionselement, welches die Strahlung nach ihrer Wellenlänge aufspaltet und räumlich trennt. Während Prismen die Strahlung beim Durchgang brechen (refraktive Dispersion), beugen Gitter die Strahlung (diffraktive Dispersion). Die Strahlung der einzelnen Gitterspalte interferiert und bildet somit räumlich getrennte Strahlungskomponenten verschiedener Wellenlänge (Interferenzmuster) (Voges und Petermann, 2002).

2.4.3 Kenngrößen

Im Sensor unterliegt die eintreffende Strahlung verschiedenen Umwandlungsprozessen, wobei das eigentliche Signal gemindert wird. Zum Verständnis und zu Simulationszwecken ist es notwendig, die einzelnen Prozesse der Signalumwandlung und -minderung zu verstehen und zu beschreiben. Da ein Schwerpunkt der Arbeit die spektrale Sensorsimulation ist, werden im Folgenden alle Kenngrößen vorgestellt, die notwendig sind, um eine solche Simulation zu realisieren. Auf die Beschreibung der räumlichen Kenngrößen wird an dieser Stelle verzichtet.

2.4.3.1 Spektrale Abtastung

Das Vermögen eines Sensors, die einfallende Strahlung in ein Signal umzuwandeln, hängt von der Wellenlänge der Strahlung ab. Man bezeichnet diese Größe als spektrale Empfindlichkeit R_λ (engl. *spectral response function*, SRF). Die SRF ist bestimmt durch die Zentrumswellenlänge λ_c und die Bandbreite $\Delta\lambda$ der Verteilung (Strobl, 2000). Die Bandbreite entspricht dabei der Halbwertsbreite (engl. *full width of half maximum*, FWHM) der Funktion. Bei relativ schmalen Bändern (bei hyperspektralen Sensoren) lässt sich die SRF durch eine Gaußfunktion (Gl. 2.13) annähernd beschreiben. Die SRF von breiten Bändern (bei multispektralen Sensoren) ähnelt mehr einer Rechteckfunktion mit unscharfen Kanten, welche mit einer modifizierten Gaußfunktion (Gl. 2.14) approximiert werden kann (Segl et al., 2006; Drusch et al.,

2010). In Abb. 2.6 sind beide Funktionen mit gleicher FWHM und Zentrumswellenlänge visualisiert.

$$R_{\lambda}^{schmal}(\lambda) = e^{-2\left(\frac{\sqrt{\ln 4}(\lambda - \lambda_c)}{\Delta\lambda}\right)^2} \quad (2.14)$$

$$R_{\lambda}^{breit}(\lambda) = e^{-32\left(\frac{\sqrt[6]{\ln 4}(\lambda - \lambda_c)}{\Delta\lambda}\right)^6} \quad (2.15)$$

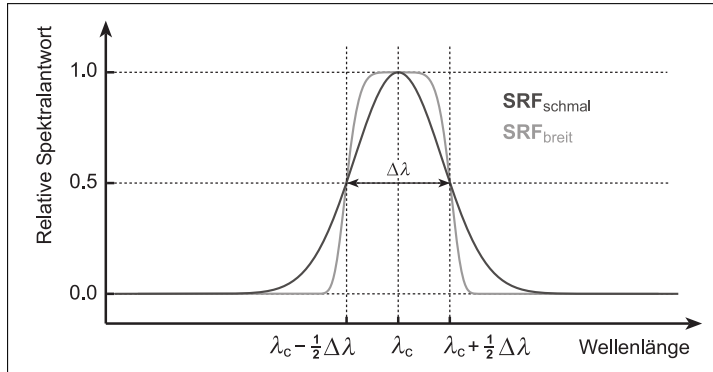


Abb. 2.6 – Normalisierte SRF zur Simulation von schmalen und breiten Bändern.

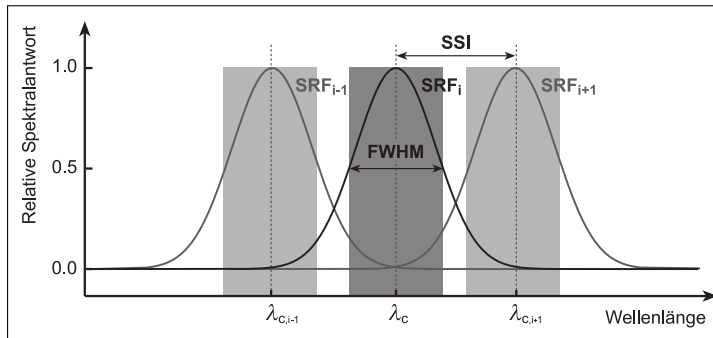


Abb. 2.7 – Kenngrößen der spektralen Abtastung.

Die eigentliche spektrale Abtastung wird durch eine Aneinanderreihung einzelner SRFs realisiert. Die Differenz der Zentrumswellenlänge zweier benachbarter spektraler Bänder bestimmt das spektrale Abtastintervall (engl. *spectral sampling interval*, SSI). Neben der SSI ist auch die Breite der Bänder maßgebend für die spektrale Auflösung. Die Daten hyperspektraler Sensoren haben eine hohe spektrale Auflösung. Viele schmale Bänder tasten kontinuierlich und in annähernd regelmäßigen Abständen den kompletten VNIR- und/oder SWIR-Wellenlängenbereich ab. Im Gegensatz zu Multispektralsensoren, die nur bestimmte Wellenlängenbereiche mittels einiger weniger Spektralbänder unterschiedlicher Breite aufnehmen können. Abb. 2.8 zeigt die spektralen Bänder bekannter multispektraler (ETM+ und RapidEye) und hyperspektraler Satellitensensoren (CHRIS und Hyperion) im Vergleich.

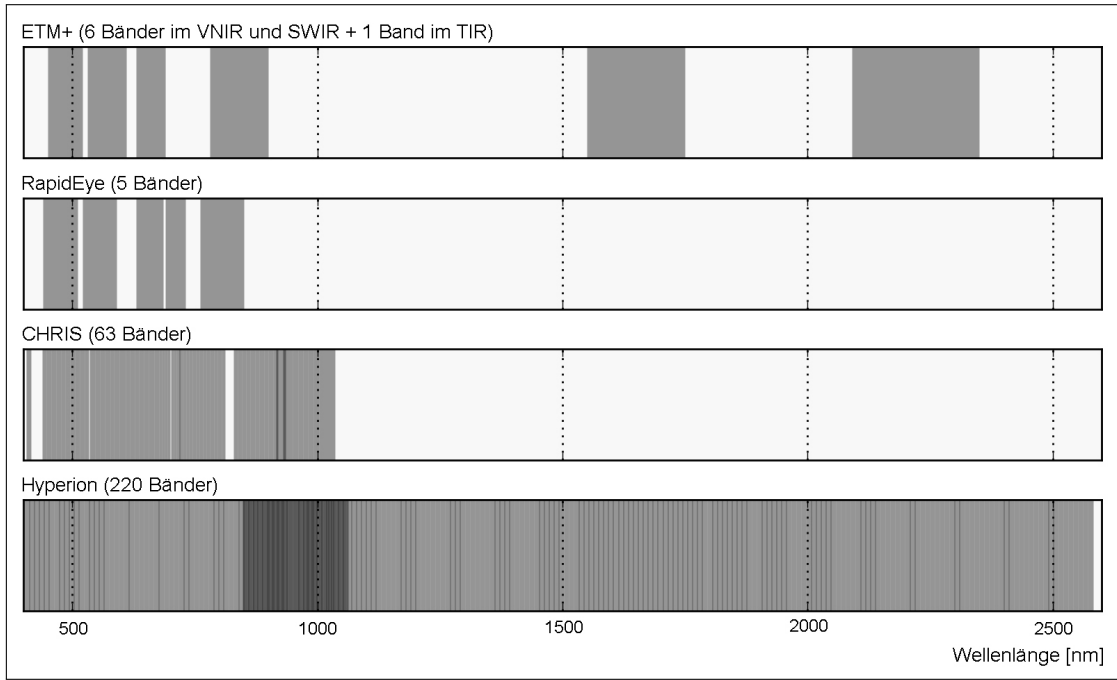


Abb. 2.8 – Die spektralen Bänder einiger bekannter multispektraler (ETM+ und RapidEye) und hyperspektraler Satellitensensoren (CHRIS und Hyperion).

2.4.3.2 Signal-Rausch-Verhältnis

Jeder Messwert ist, bedingt durch die jeweilige Messtechnik, einer statistischen Unsicherheit ausgesetzt, die als Rauschen bezeichnet wird, welches durch Schwankungen in den Messwerten registriert werden kann. Das Messsignal muss dabei deutlich stärker sein als das Messrauschen, da die gemessene Information sonst nicht extrahiert werden kann. Die Leistungsfähigkeit eines Sensors definiert sich deshalb über das Verhältnis zwischen objektspezifischem Signal und sensorspezifischem Rauschen, kurz dem Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *signal-to-noise-ratio*, SNR) (Albertz, 2007). Zur Simulation von Messrauschen wird ein Gaußsches Rauschen angenommen, dessen Standardabweichung durch das rauschäquivalente Signal (engl. *noise equivalent radiance*, NER)

$$NER = \frac{L}{SNR} \quad (2.16)$$

bestimmt wird.

2.4.3.3 Radiometrische Abtastung

Der Detektor konvertiert das optisch empfangene Signal in ein kontinuierlich zeitlich veränderliches, elektronisches Signal. Dabei bewirken die eintreffenden Photonen die Freisetzung von Elektronen. Dieser Prozess wird photoelektrischer Effekt genannt, charakterisiert durch die Quantenausbeute (engl. *quantum efficiency*, QE). Sie gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Elektron frei gesetzt wird (Haken und Wolf, 2004). Um eine für den anschließenden A/D-Wandler hinreichende Signalstärke zu gewährleisten, muss das elektronische Signal e_i verstärkt werden, ohne dabei aber eine Sättigung zu bewirken. In der Sensorelektronik wird

deshalb der maximale Wertebereich der aufgenommenen Signale sowie der ausgegebene Messbereich des dazugehörigen Detektorelements bestimmt. Die Verstärkung folgt einer linearen Funktion. Dabei wird ein lineares Verhalten bei der Signalwiedergabe innerhalb des gesamten Signalwertebereichs angenommen. Die Parameter der Signalverstärkungsfunktion (*gain* und *offset*) werden anschließend so bestimmt, dass der komplette DN-Wertebereich vom A/D-Wandler zur Signalwiedergabe genutzt wird (Schowengerdt, 1997). Das verstärkte Signal a_i ergibt sich somit zu

$$a_i = \textit{gain}_i e_i + \textit{offset}_i . \quad (2.17)$$

Am Ende der Signalverarbeitungskette steht der A/D-Wandler, der das verstärkte Signal zeitdiskret abtastet und als DN quantisiert. Dabei wird das elektronische Signal in ein wertdiskretes digitales Signal umgewandelt, d.h. eine Aufteilung des gemessenen Signalwertebereichs in eine endliche Zahl aneinander angrenzender Teilbereiche. Die Anzahl dieser Teilbereiche gibt die radiometrische Auflösung wieder, welche meist durch Bits pro Pixel Q angegeben wird, zahlenmäßig aber 2^Q entspricht. In der spektralen Sensorsimulation kann dieser Schritt mit dem `int`-Operator wiedergegeben werden:

$$DN_i = \textit{int}[a_i] . \quad (2.18)$$

3 Optische Fernerkundung von Vegetation

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zum aktuellen Verständnis der Fernerkundungssignale von Vegetation und über den aktuellen Stand der Methoden zur Modellierung solcher Signale. Das Kapitel ist inhaltlich in drei Teile gegliedert. Der erste Teil umfasst die Beschreibung des durch optische Fernerkundung messbaren Reflexionssignals sowie die Einflüsse, denen die elektromagnetische Strahlung bei der Interaktion mit Vegetation unterliegt. Im zweiten Teil werden Modellierungsansätze zur Simulation des Reflexionsvermögens von Vegetation vorgestellt, wobei der Schwerpunkt wegen der Relevanz für diese Arbeit auf den Bestandsreflexionsmodellen liegt. Der dritte Teil gibt einen kurzen Abriss zu den Vegetationsindizes, welche neben den Reflexionswerten eine wichtige Informationsquelle bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten darstellen.

3.1 Reflexion von Vegetation

Im optisch reflektiven Bereich der elektromagnetischen Strahlung ist die Vegetationsbestandsreflexion durch eine Kombination verschiedenster Einflüsse auf drei unterschiedlichen Skalen beeinflusst. Auf der Blattebene bestimmen die blattimmanenten Eigenschaften wie Blattaufbau, Zellstruktur und chemische Inhaltsstoffe, das Signal. Auf der Pflanzenebene hat vor allem deren Morphologie und physiologische Entwicklung einen entscheidenden Einfluss und auf der Bestandsebene beeinflusst die Verteilung der Pflanzen, ihre gegenseitige Beschattung sowie der Bodengrund das Reflexionssignal (Ross, 1981).

3.1.1 Einflüsse auf Blattebene

Die Blätter sind die Strahlungsempfänger einer Pflanze. Sie absorbieren je nach Pflanzenart 80 % bis 90 % der gesamten von der Pflanze absorbierten Strahlung (Ross, 1981). Bei der Betrachtung der Oberflächenanteile der Blätter (z.B. bis zu 90 % bei Laubbäumen (Reth, 2000)) gegenüber den anderen Pflanzenorganen wird deren große Bedeutung für die Fernerkundung deutlich.

Die auf das Blatt auftreffende Strahlung wird entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Die jeweiligen Anteile sind von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der Strahlung, der Oberflächenrauigkeit, der Zellstruktur sowie von den biochemischen Inhaltsstoffen abhängig. Die reflektierte Strahlung besteht aus drei Teilen, dem an der Blattoberfläche direkt reflektierten Anteil, dem wieder austretenden, im Blatt diffus gestreuten Strahlungsanteil (Verdebout et al., 1994), und dem als Fluoreszenz austretenden Teil. Die transmittierte Strahlung entspricht der an der Unterseite des Blattes austretenden, im Blatt diffus gestreuten, Strahlung. Die Differenz zwischen einfallender Strahlung und der Summe aus reflektiertem und transmittiertem Strahlungsanteil ist die absorbierte Strahlung. Die Fluoreszenzstrahlung entsteht bei der Absorption von Strahlung. Die nach Relaxation des Elektronenübergangsprozesses frei werdende Energie wird als Strahlung wieder abgegeben. Die emittierte Strahlung

ist dabei immer langwelliger als die Absorbierte, da ein Teil der Energie für die Photosynthese genutzt wird oder zu Wärme wird (Häder, 1999). Das Reflexionsspektrum eines grünen vitalen Blattes, egal welcher Art, ist dabei immer in gleicher Weise charakterisiert (siehe Abb. 3.1) (Curran, 1989). Im visuellen Bereich (engl. *visual*, VIS) überwiegt die Absorption der Blattpigmente mit Banden bei 420 nm, 490 nm und 680 nm. Zwischen 690 nm und 720 nm folgt ein starker Anstieg, die sogenannte *Red-Edge*, erstmals beschrieben von Collins (1978). Die *Red-Edge* ist das charakteristische Merkmal von Vegetation. Die Steigung im Wendepunkt sowie die Position des Wendepunktes korrelieren mit dem Chlorophyllgehalt (Kumar et al., 2001). Der NIR-Bereich zwischen ca. 700 nm und 1300 nm ist vor allem durch hohe Reflexion und Transmission charakterisiert, während nur noch ein geringer Teil der Strahlung durch das Zellwasser (Bande bei 1200 nm) absorbiert wird (Maas und Dunlap, 1989). Im SWIR überwiegt die Absorption des Wassers (Banden bei 1450 nm, 1940 nm und 2500 nm), welche bei frischen grünen Blättern die Absorption anderer Blattinhaltsstoffe, wie z.B. Zellulose und Lignin, überlagert. Wegen der sehr starken Absorptionseigenschaften des Wassers im SWIR bewirkt eine Änderung des Wassergehaltes nicht nur Änderungen in der Bandentiefe sondern auch Änderungen der Reflexionsintensität in den Bereichen zwischen den Banden (Kumar et al., 2001). Im Folgenden werden die auf das Blattspektrum wirkenden Einflüsse vorgestellt.

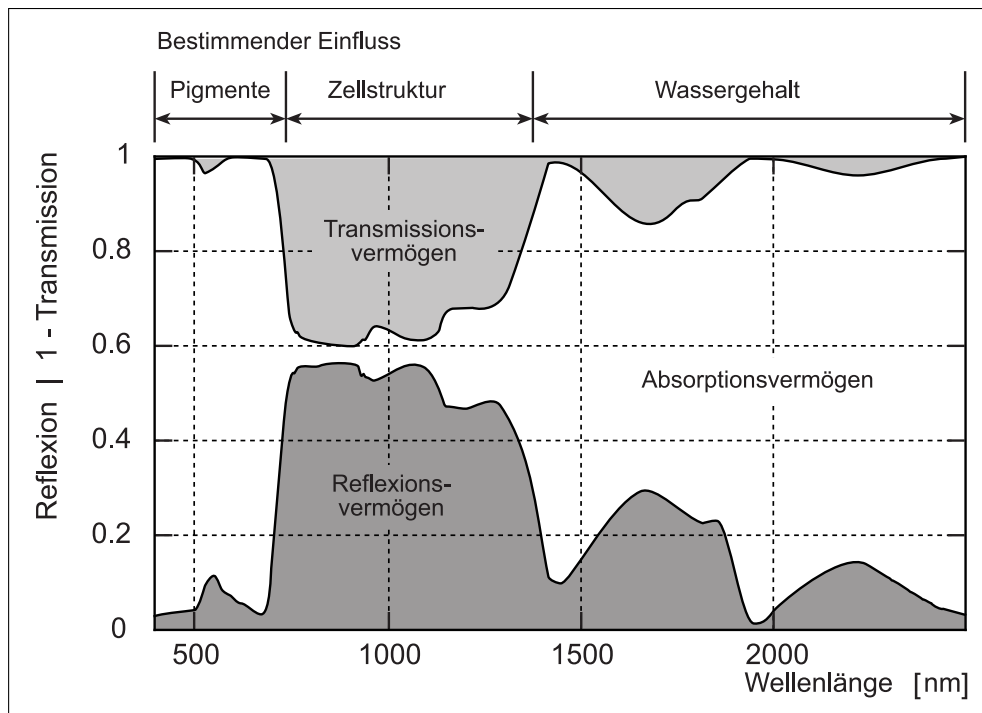


Abb. 3.1 – Spektrales Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsvermögen eines vitalen Laubblattes mit den Wirkungsbereichen des jeweils bestimmenden Einflusses.

3.1.1.1 Blattstruktur

Obwohl es zahlreiche anatomisch unterschiedliche Blätter der verschiedensten Pflanzenarten gibt, so sind doch die wichtigsten Strukturelemente immer gleich. Die Variabilität der

blattoptischen Eigenschaften ist dabei allein durch deren Anordnung innerhalb des Blattes bestimmt (Verdebout et al., 1994 in Kumar et al., 2001). Ein typisches Laubblatt ist flach und nur einige Zellen dick (Fosket, 1994 in Kumar et al., 2001). Es besteht vor allem aus sehr wasserhaltigen Zellen und den dazwischen liegenden mit Luft gefüllten Interzellularen, umhüllt von einer schützenden, oft wachshaltigen Schicht, der Kutikula. Abb. 3.2 zeigt eine typische Blattstruktur. Die Zellen des Pallisaden- und Schwammgewebes enthalten die Chloroplasten, die grünen Zellorganellen, in denen sich wiederum die Blattpigmente wie Chlorophyll, Karotinoide u.a. befinden.

Ein Teil der auf das Blatt treffenden Strahlung wird direkt an der Oberfläche, also der Kutikula, reflektiert. Dieser Anteil sowie die Art und Weise der Reflexion variiert in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit. Eine wachshaltige Kutikula führt z.B. zu einer höheren und nahezu spiegelnden Reflexion, während bei behaarten Blättern die Reflexion diffuser und niedriger ist (Gates, 1970; Erasmi, 2002). Der Teil der Strahlung, der in das Blatt eindringt, unterliegt zahlreichen Prozessen:

- mehrfache Streuung und Brechung an den Zellwänden innerhalb der Zellen, vor allem aber in den luftgefüllten Interzellularen;
- mehrfache Streuung und Brechung an den Chloroplasten und anderen Zellorganellen in den Zellen;
- Absorption durch Blattpigmente in den Chloroplasten, Zellwasser und anderen Blattinhaltsstoffen.

Die innerhalb des Blattes auftretende mehrfache Streuung und Brechung der Strahlung bewirkt ein nahezu Lambertsches Verhalten beim Austreten der Strahlung (Kumar et al., 2001). Die für Vegetation typische hohe Reflexion von ca. 45 % bis 50 % im NIR ist nur durch die Blattstruktur bedingt (Kumar et al., 2001). Dabei ist die Größe der Grenzfläche zwischen wasserhaltigen Zellen und luftgefüllten Interzellularen ein Maß für den Reflexionsgrad im NIR (Knippling, 1970; Buschmann, 1993 in Kumar et al., 2001).

3.1.1.2 Blattpigmente

Alle Pflanzen haben Blattpigmente, welche es ihnen ermöglichen, Sonnenstrahlung zu absorbieren und diese für die Photosynthese zu nutzen. Es gibt verschiedene Blattpigmente mit unterschiedlichen Absorptionsbereichen, die je nach Standort und Pflanzenart (unter Wasser oder auf dem Land, in der Sonne oder im Schatten anderer Pflanzen) in verschiedenen Zusammensetzungen in den Pflanzen vorkommen. Alle Pflanzen enthalten Chlorophyll a, da es eine entscheidende Rolle bei der Photosynthese spielt (z.B. in Form von P680 und P700) (Kumar et al., 2001). Manche Chlorophyllarten kommen dagegen nur in bestimmten Pflanzenarten vor, so ist z.B. Chlorophyll b vorwiegend in höher entwickelten Pflanzen enthalten. Neben den insgesamt 10 bisher bekannten Chlorophyllarten gibt es noch die akzessorischen Pigmente¹, deren Absorptionsmerkmale von dem anteilig sehr dominierenden Chlorophyll (ca. 65 % nach Gates et al., 1965) überlagert werden. Erst wenn das Chlorophyll in den Blättern abgebaut wird (z.B. bei Blattalterung), werden die gelben Karotine und die roten

¹Akzessorische Pigmente sind Hilfspigmente der Photosynthese (Heath, 1972).

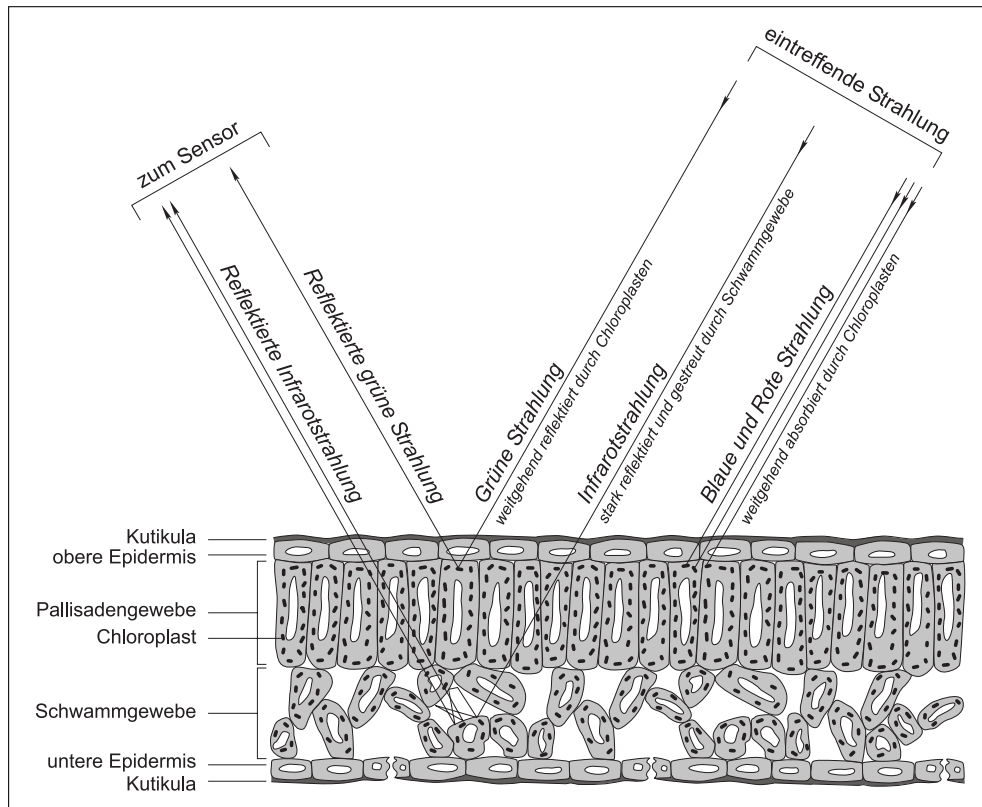


Abb. 3.2 – Schematische Darstellung der Struktur eines Laubblattes sowie des Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsverhaltens einfallender Strahlung im VNIR.

Xanthophylle (beide zur Gruppe der Karotinoide gehörend) sichtbar. Abb. 3.3 zeigt Beispiele für Absorptionskurven der häufigsten Blattpigmente. Die beiden Absorptionsmaxima von Chlorophyll im blauen und roten Wellenlängenbereich bewirken ein Reflexionsmaximum im grünen Bereich und sind somit der Grund für die grüne Blattfarbe aller Pflanzen.

3.1.1.3 Blattinhaltsstoffe

Die Hauptbestandteile eines grünen Laubblattes sind Wasser, Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Neben diesen sind zahlreiche Pflanzennährstoffe, wie z.B. Stickstoff und Phosphor, in den Blättern enthalten sowie die von der Pflanze produzierten Stoffe zur Energiespeicherung (z.B. Stärke). Zellulose ist die am häufigsten vorkommende organische Substanz terrestrischer Ökosysteme. Die trockene Biomasse einer Pflanze besteht zu ca. 35 % bis 50 % aus Zellulose (Elvidge, 1990). Sie dient, wie auch Hemizellulose, dem Aufbau der Zellwände aller Pflanzenzellen. Lignin wird vor allem zur Zellwandstabilisation aufgebaut und bewirkt bei vermehrtem Aufbau die Verholzung grüner Pflanzenteile.

Bei vitalen Laubblättern überwiegen die Absorptionseigenschaften von Wasser. Bei alten vertrockneten Blättern hingegen sind keine Wasser- und Chlorophyllbanden mehr zu sehen, so dass vor allem die Absorptionsbanden von Zellulose (bei 1930 nm, 2100 nm, 2340 nm und 2480 nm) und Lignin (bei 1930 nm, 2140 nm, 2270 nm und 2500 nm) im SWIR sichtbar

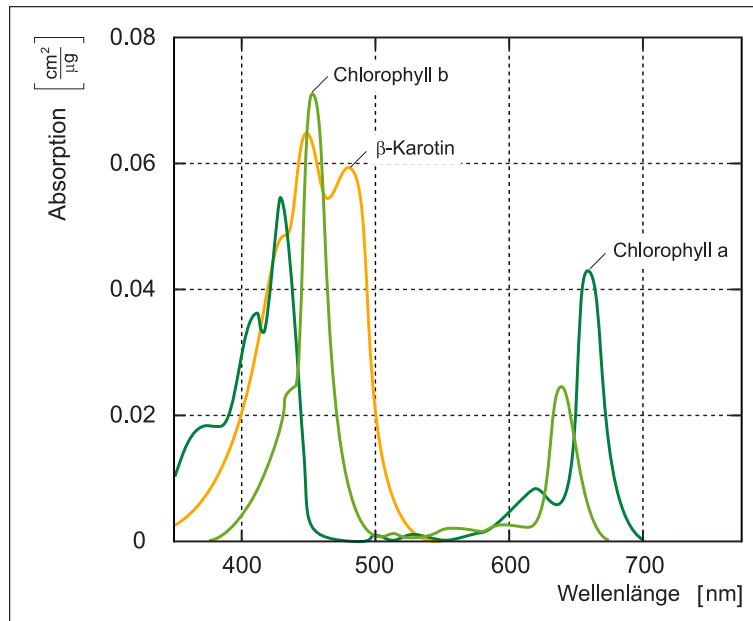


Abb. 3.3 – Absorptionsvermögen ausgewählter Blattpigmente, Daten von Purves et al. (1998) in (Kumar et al., 2001).

sind. Die Pflanzennährstoffe bewirken keine sichtbaren Absorptionsmerkmale, jedoch sind Kopplungseffekte mit anderen Blattinhaltsstoffen oder Blattpigmenten bekannt, wonach die mengenmäßige Veränderung eines Stoffes den Gehalt eines anderen beeinflusst (Damm, 2008). Ein Beispiel ist die Kopplung des Stickstoffgehalts mit dem von Chlorophyll (Grant, 1987; Curran, 1989 in Damm, 2008).

3.1.2 Einflüsse auf Pflanzen- und Bestandsebene

Das bidirektionale Reflexionsvermögen von Vegetationsbeständen ist durch die Interaktion der einfallenden Strahlung mit den Pflanzen und dem Bodengrund des Bestandes, deren optische Eigenschaften und der Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung bestimmt. Dabei wird hauptsächlich durch die komplexe Volumenstreuung und den Schatten innerhalb des Bestandes eine anisotrope Reflexion hervorgerufen. Volumenstreuung und Schattenwurf sind durch die Bestandsarchitektur bestimmt.

Ein Vegetationsbestand besteht aus vielen Einzelpflanzen, die auf einem Bodengrund angeordnet sind. Die Bestandsarchitektur ist charakterisiert durch die Morphologie (Aufbau und Gestalt) der Pflanzen und Pflanzenorgane, bestimmt durch Phänologie (Wachstumsphase) und Vitalität, Anordnung und Dichte der Pflanzen, Zusammensetzung der Pflanzenarten sowie der Struktur des Bodengrunds.

Eine entscheidende Größe bei der Betrachtung einzelner Pflanzen oder eines Bestandes ist die Blattoberfläche, quantifiziert durch den Blattflächenindex (engl. *leaf area index*, LAI). Während das Reflexionsvermögen von Vegetationsbeständen im VIS und SWIR mit zunehmenden LAI abnimmt, erhöht es sich im NIR. Der Grund liegt in der Volumenstreuung. Bei der Interaktion der Strahlung mit dem Vegetationsbestand durchquert die Strahlung mehrere

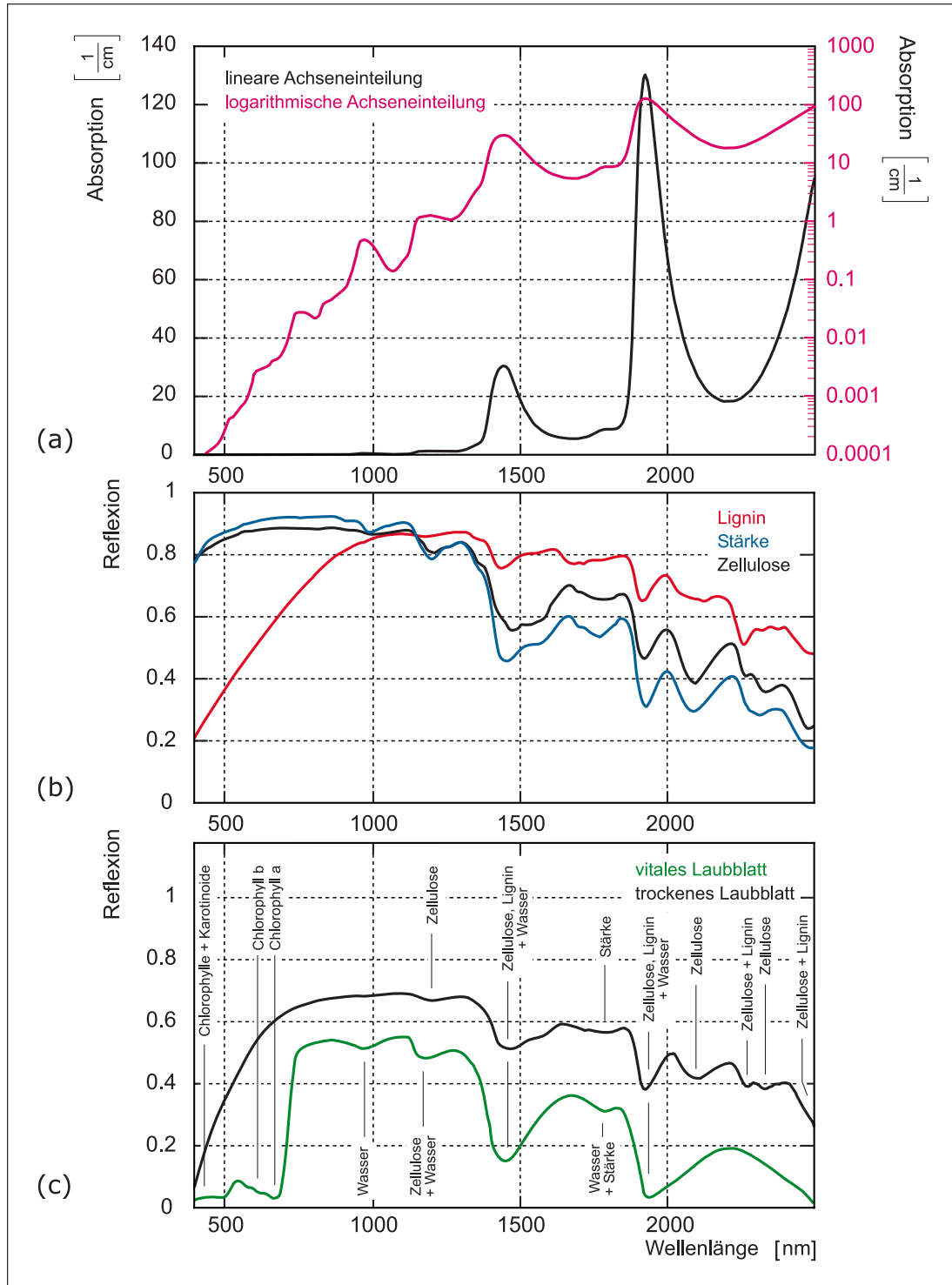


Abb. 3.4 – Absorptions- und Reflexionsvermögen diverser Blattinhaltsstoffe im Vergleich mit dem Reflexionsvermögen eines vitalen und eines trockenen Laubblattes: (a) Absorptionsvermögen von Wasser in linearer und in logarithmischer Darstellung, Daten aus PROSPECT5 (Féret et al., 2008); (b) Reflexionsvermögen von Zellulose, Lignin und Stärke, Daten von Elvidge (1990); (c) Reflexionsvermögen eines vitalen und eines trockenen Laubblattes mit den hauptsächlich die Banden verursachenden Stoffen.

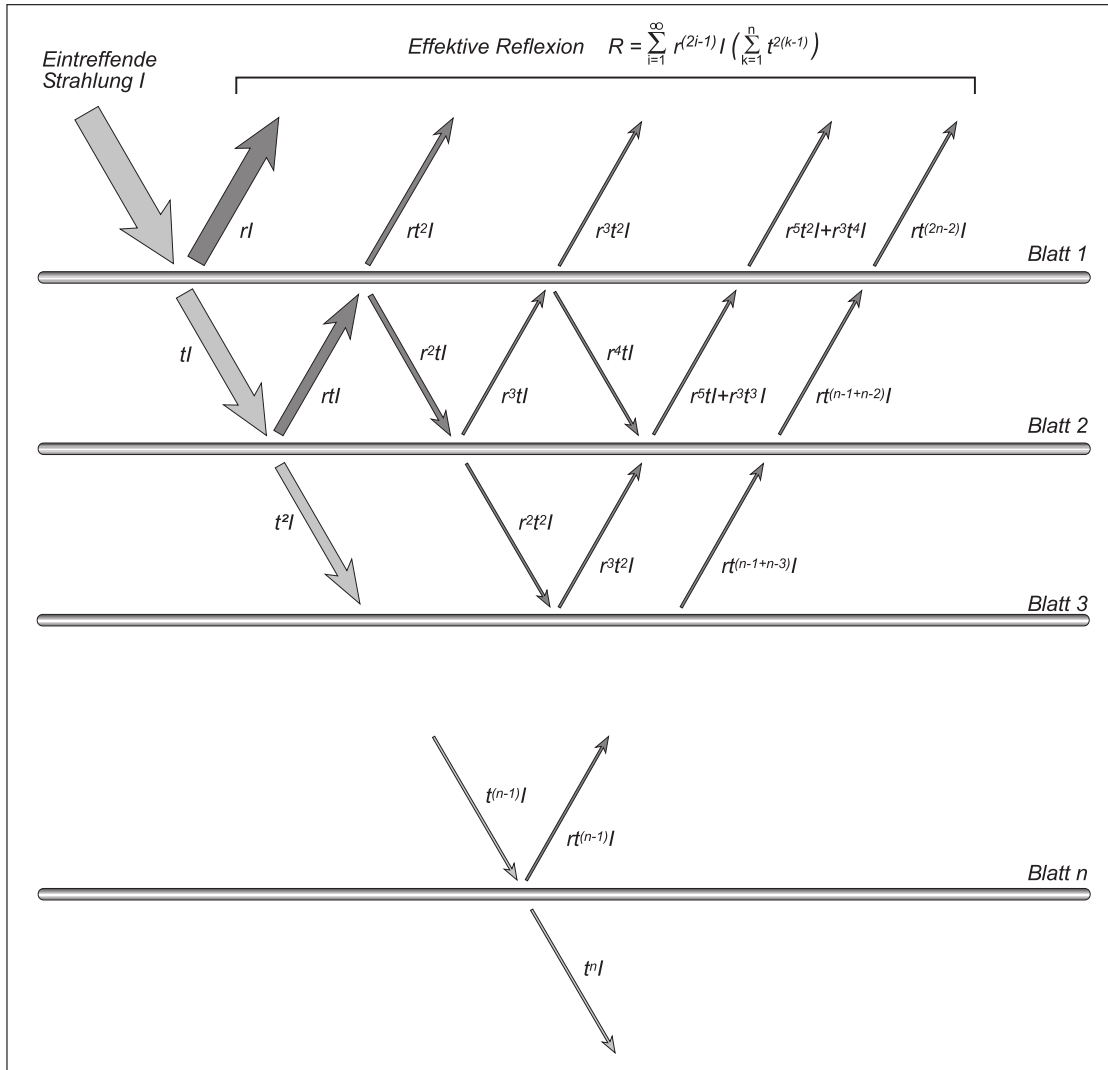


Abb. 3.5 – Der Effekt von mehreren Blattschichten auf das Reflexionsvermögen (Verändert nach Hoffer, 1978 in Kumar et al., 2001).

Blattschichten. Dies hat einen additiven Effekt sowohl auf die Reflexion und Transmission als auch auf die Absorption (Hoffer, 1978 und Belward, 1991 in Kumar et al., 2001). In Abb. 3.5 ist dieser Effekt dargestellt. Der vom ersten Blatt transmittierte Strahlungsteil trifft im Bestand auf weitere Blätter, wobei wieder ein Teil transmittiert und einer reflektiert wird. Myers (1970) beobachtete z.B. einen Anstieg des Reflexionsvermögens im NIR von 50 % für ein Blatt auf 84 % für 6 Blätter (Kumar et al., 2001). Ab einer bestimmten Zahl an Interaktionen tritt eine Sättigung des Effektes ein, die von den Reflexions-, Transmissions- und Absorptionseigenschaften der Blätter abhängt. Die Sättigung tritt z.B. im VIS für LAI-Werte zwischen 2 und 3 und im NIR für LAI-Werte zwischen 6 und 8 auf (Goel, 1988). Das impliziert, dass die Ableitung des LAIs aus Fernerkundungsdaten in diesen Wellenlängenbereichen bei höheren Werten nur schwer möglich ist.

Vegetationsbestände sind anisotrope Reflektoren, deren spektrale Variabilität bedingt durch optische und strukturelle Eigenschaften des Bestandes, in der BRDF abgebildet wird. Die Betrachtung der BRDF eines Vegetationsbestandes ermöglicht somit die Ableitung struktureller Information (Sandmeier und Deering, 1999). Eine Möglichkeit, die BRDF von Vegetationsbeständen zu ermitteln, ist die Approximation durch aufwendige Goniometermessungen (z.B. Sandmeier, 2000; Strub et al., 2002; Schneider et al., 2007; Landis und Aber, 2007 and Huang et al., 2008). Eine weitere Möglichkeit ist die Modellierung mittels Reflexionsbestandsmodellen. Diese werden in Abschn. 3.3 detailliert vorgestellt.

Die BRDF eines Vegetationsbestandes zeigt an bestimmten Stellen Eigenschaften, die weitestgehend für alle Vegetationsbestände gelten. Die Kombination aus objektfreien Zwischenräumen und gegenseitiger Beschattung, wie sie bei Vegetation typisch ist, erzeugt vor allem bei erectophilen (die Haltung der Blätter ist eher vertikal gerichtet) Beständen ein lokales Minimum nahe dem Nadirpunkt im Bereich der Vorwärtsstreuung (Beleuchtung gegenüber dem Beobachter), ein lokales Maximum im Bereich der Rückwärtsstreuung (Beleuchtung hinter dem Beobachter), sowie eine allgemeine elliptisch konkave Form (vgl. Abb. 3.6 und 3.7) (Kumar et al., 2001). Denn der Anteil der beobachteten Schattenflächen nimmt vom Bereich der Vorwärtsstreuung in den Bereich der Rückwärtsstreuung bis zu dem Punkt ab, wo keine Schatten mehr zu sehen sind (*Hotspot*), da Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung koinzidieren. Vor allem in planophilen (die Haltung der Blätter ist eher horizontal gerichtet) Beständen kommt es neben dem *Hotspot* noch zu einem weiteren lokalen Maximum im Bereich der Vorwärtsstreuung (Spiegelpunkt des *Hotspot*), das durch spiegelnde Reflexion bedingt ist (Sandmeier et al., 1998). Der *Hotspot* ist im VIS stärker ausgebildet als im NIR, da er ein Effekt der einfachen Streuung - also der ersten Strahlungsinteraktion - ist. Das Reflexionsvermögen im NIR hingegen ist durch die Volumenstreuung charakterisiert (Kumar et al., 2001). Die Struktur der einzelnen Pflanzen stellt dabei den bestimmenden Faktor der BRDF (Ross und Marshak, 1988; Gerstl, 1988), wobei Blattgröße und Blattorientierung eine entscheidende Rolle spielen. Ross und Marshak (1989) beobachteten z.B. bei kleinen Beleuchtungszenitwinkeln eine allgemein höheres Reflexionsvermögen bei Beständen mit einem höheren Anteil horizontal orientierter Blätter. Die Blattgröße beeinflusst vor allem den Bereich um den *Hotspot* und den Nadir (Ross und Marshak, 1991), wobei kleinere Blätter einen schmaleren *Hotspot* und eine geringeres Reflexionsvermögen im Nadirbereich bewirken. Generell kann man davon ausgehen, dass die BRDF-Effekte bei erectophilen Beständen stärker ausgeprägt sind als bei planophilen Beständen (Sandmeier et al., 1998).

3.2 Modellierung von Blattreflexion

Das bekannteste Modell zur Modellierung von Blattreflexion ist das Blattschichtmodell PROSPECT von Jacquemoud und Baret 1990. Die Modelle der Blattschichten beschreiben die innere Blattstruktur als eine einzelne horizontale Schicht, charakterisiert durch einen Absorptionskoeffizienten und einen Refraktionssindex. Reflexion und Transmission des Blattes werden dabei durch Annahme mehrfacher Streuung innerhalb der Schicht und durch Nutzung geometrisch-optischer Prinzipien bestimmt (Liang, 2004). PROSPECT ist ein Mehrschichtenmodell. Die Blattstruktur wird durch mehrere horizontale Schichten mit luftgefüllten Zwischenräumen beschrieben (engl. *N-plate leaf model*). Jede Schicht ist durch einen Transmis-

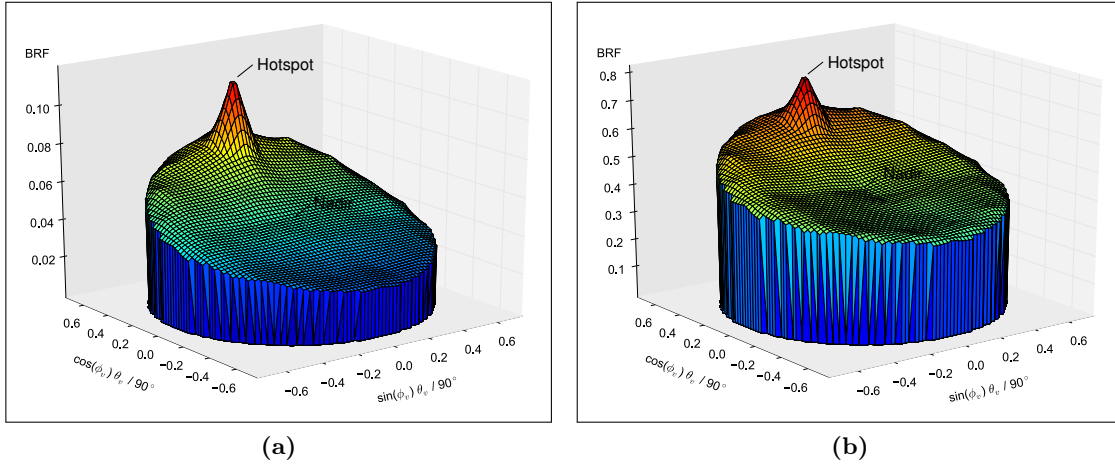


Abb. 3.6 – BRDF eines Vegetationsbestandes (aus selbst modellierten Daten abgeleitet) bei (a) 550nm (VIS) und (b) 900nm (NIR) mit einem Sonnenzenitwinkel von 40° (Hotspot).



Abb. 3.7 – Anisotrope Reflexionseffekte eines Roggenbestandes: a) Vorwärtsstreuung (Sonne gegenüber dem Beobachter), b) Rückwärtsstreuung (Sonne hinter dem Beobachter).

sionskoeffizienten und einen Refraktionsindex charakterisiert, wobei der Transmissionskoeffizient aus den Absorptionskoeffizienten verschiedener Blattpigmente und Blattinhaltsstoffe bestimmt wird. Das Reflexions- und -transmissionsvermögen eines Blattes wird dann in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, der Anzahl der Schichten, dem Chlorophyllgehalt und dem Wassergehalt bestimmt (Jacquemoud und Baret, 1990). Das aktuelle PROSPECT5 (Féret et al., 2008) basiert zusätzlich auf dem Gehalt von Karotinoiden und Trockenmasse. In einer unveröffentlichten Version wurde zusätzlich der Einfluss brauner Pigmente mit aufgenommen, um das Reflexions- und Transmissionsvermögen trockener Blätter zu modellieren (F. Baret, persönlich kommuniziert, 2009). Neben PROSPECT sind weitere auf der biochemischen Zusammensetzung basierende Modelle entwickelt worden. Während LEAFMOD (Leaf Experimental Absorptivity Feasibility MODel) (Ganapol et al., 1998) sich wie PROSPECT zur Modellierung von Laubblattspektren eignet, ist LIBERTY (Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields) (Dawson et al., 1998) speziell für Nadelblätter entwickelt worden. Ein großer Vorteil dieser Modelle ist deren Invertierbarkeit, d.h.

durch das Vergleichen von in situ gemessenen Blattreflexionsspektren mit modellierten Spektren lassen sich die Anteile der verschiedenen Blatthaltsstoffe und Pigmente bestimmen. Weitere Modellierungsansätze sind Raytracingmodelle wie z.B. RAYTRAN (Govaerts, 1996; Govaerts und Verstraete, 1998) oder stochastische Modelle wie z.B. SLOP (Stochastic model for Leaf Optical Properties) (Lüdeker und Günther, 1990; Maier et al., 1999; Maier, 2000), auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

3.3 Modellierung von Bestandsreflexion

Es sind eine Reihe von Arbeiten zum Verständnis und zur Simulation bidirektionaler Reflexion von Vegetationsbeständen entwickelt worden, die sich hauptsächlich in der Art und Weise der Beschreibung der Bestandsarchitektur unterscheiden. Diese Modelle lassen sich grundsätzlich nach drei verschiedenen Ansätzen einteilen: Strahlungstransfermodelle, geometrisch-optische Modelle und computergraphische Modelle (Goel, 1988; Strahler, 1997).

3.3.1 Strahlungstransfermodelle

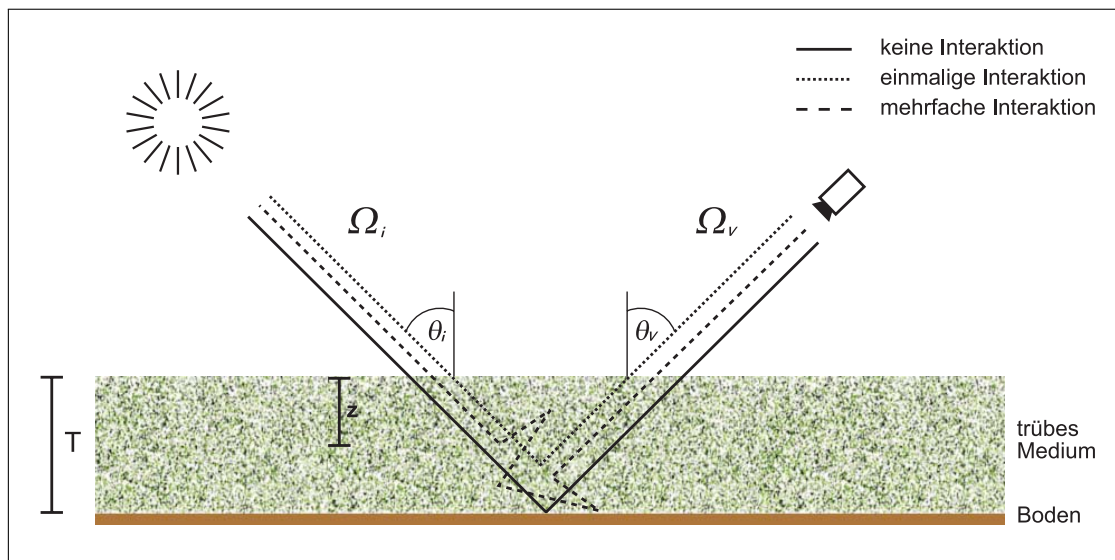


Abb. 3.8 – Schematische Darstellung des Trüben-Medium-Ansatzes (nach Disney, 2001).

Bei Strahlungstransfermodellen wird die Vegetation als eine Art trübes Medium, ähnlich der Atmosphäre, betrachtet. Diese Annahme ermöglicht eine modifizierte Anwendung der klassischen Strahlungstransfertheorie, welche ursprünglich von Chandrasekhar (1960) für die Beschreibung der Lichtausbreitung in Sternatmosphären entwickelt wurde. Dabei wird angenommen, dass die Interaktion von Photonen mit einem Vegetationsbestand gleich der von Photonen mit einem Gas ist. Die Photonen interagieren mit einzelnen infinitesimalen, streuenden Elementen, welchen die optischen Eigenschaften von Blättern zugewiesen wurden. Weiterhin wird angenommen, dass das Medium eine homogene, horizontal infinite und vertikal finite Ebene ist, die nach unten hin durch ein opakes Medium begrenzt wird. Das aus der Photoneninteraktion resultierende Strahldichtefeld (siehe Abb. 3.8) kann unter Berücksichtigung der Energieerhaltung innerhalb des Vegetationsbestandes und definierter externer

Strahlungsquellen beschrieben werden. Das Ergebnis ist eine Integro-Differentialgleichung¹, die die Änderung der Strahlungsintensität entlang einer Beobachtungsrichtung Ω_v beschreibt, bestimmt durch Interaktionen, die Strahlung aus der Beleuchtungsrichtung Ω_i wegstreuen und Interaktionen, die Strahlung aus anderen Richtungen in die Beobachtungsrichtung Ω_v hinein streuen. Im einfachsten Fall (bei Vernachlässigung von Polarisierung, Frequenzverschiebungen und Emission) können so die aufwärts und abwärts gerichteten Strahlungsflüsse im Vegetationsbestand als Lösung der Strahlungstransfergleichung (Gl. 3.1) beschrieben werden (Disney, 2001).

$$\cos \theta_v \frac{\partial I(z, \Omega_v)}{\partial z} = \sigma_e(z, \Omega_v) I(z, \Omega_v) - \int_{4\pi} \sigma_s(z, \Omega_i \rightarrow \Omega_v) I(z, \Omega_i) d\Omega_i \quad (3.1)$$

$I(z, \Omega_v)$ ist die spezifische Strahlungsintensität bei einer Tiefe z in einem Bestand der absoluten Höhe T , wobei $0 < z < T$. σ_e ist der Extinktionskoeffizient des trüben Mediums und σ_s ist der differentielle Streukoeffizient, der die Streuung der Photonen aus dem Raumwinkel der Beleuchtungsrichtung in den der Beobachtungsrichtung angibt. $\int_{4\pi}$ steht für die Integration über die gesamte Sphäre. Die Gleichung kann numerisch (z.B. Gutschick und Wiegel, 1984; Shultis und Myneni, 1988 und Liang und Strahler, 1993) gelöst oder durch ein Differentialgleichungssystem (z.B. 3 Gleichungen bei Allen et al., 1970, 4 Gleichungen bei Suits, 1972 und 4 Gleichungen bei Verhoef, 1984) approximiert werden (Liang, 2004).

Die Vegetation als trübes Medium zu betrachten, erwies sich als ein sehr leistungsfähiger Ansatz, aus dem zahlreiche Anwendungen entwickelt wurden (z.B. Goel und Strebel, 1984; Camillo, 1987; Myneni et al., 1988; Shultis und Myneni, 1988; Nilson und Kuusk, 1989 und Pinty et al., 1990). Da die streuenden Elemente (die Blätter der Vegetation) jedoch sehr viel größer sind als die Wellenlänge der betreffenden Strahlung, genügt der klassische Ansatz vielen Anwendern nicht. Der Bedarf, Blätter als Objekte finiter Größe sowie deren Orientierung einzubeziehen, führte zu Weiterentwicklungen der trüben Medien. Dabei wird das Strahldichtefeld in Abhängigkeit von Blattflächenindex und Blattwinkelverteilung (engl. *leaf angle distribution*, LAD) beschrieben (z.B. Suits, 1972; Ross, 1981 und Verhoef, 1984) (Liang, 2004). Außerdem erzeugen Objekte finiter Größe Schatten, was die Intensität des Reflexionsvermögens beeinflusst und bei gleicher Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung zum *Hotspot* führt. Die Amplitude und die Form (Profil durch die Hauptebene der BRDF) des *Hotspots* hängen dabei von den Bestandparametern (Blattfläche, Blattform, Blattgröße, Blattorientierung, Bestandshöhe u.a.) sowie dem Zenitwinkel der Beleuchtung ab. Die Beschreibung einer *Hotspot*-Funktion ermöglicht die Einbeziehung des Effektes (z.B. Marshak, 1989; Verstraete et al., 1990; Jupp und Strahler, 1991; Kuusk, 1991; Knyazikhin et al., 1992 und Qin und Goel, 1995) (Liang, 2004).

Das bekannteste Strahlungstransfermodell ist SAIL (Scattering Arbitrary Inclined Leaves) von Verhoef (1984), das als Erweiterung des 1D-Modells von Suits (1972) entwickelt wurde. Es bestimmt das bidirektionale Reflexionsvermögen von homogenen Vegetationsbeständen durch die Lösung des Strahlungstransfers von vier Strahlungsflüssen innerhalb des Bestandes (direkter solarer Strahlungsfluss, diffuser abwärtsgerichteter Strahlungsfluss, diffuser aufwärtsgerichteter Strahlungsfluss, Strahlungsfluss in Beobachtungsrichtung) (Jacquemoud

¹Eine Integro-Differentialgleichung beinhaltet Integrale und Ableitungen einer Funktion sowie die Funktion selbst (Lakshmikantham und Rao, 1995).

et al., 2006). Die Beschreibung der Bestandsstruktur erfolgt durch den LAI und die LAD. Seit seiner Entwicklung sind viele verschiedene Erweiterungen und Versionen entwickelt worden: SAILH bezieht den *Hotspot*-Effekt von Kuusk (1991) ein, FLSAIL (Rosema et al., 1991) und FluorSAIL (Miller et al., 2005) berücksichtigen die Fluoreszenz, GeoSAIL kombiniert das SAIL-Modell mit einem geometrischen Modell zur Simulation heterogener Bestände (Huemmrich, 2001), SAILVTIR zur Bestimmung der Emission und Temperatur von Vegetationsbeständen (Verhoef et al., 2007a), sowie 4SAIL, eine numerisch robustere und optimiertere Version von SAIL (Verhoef et al., 2007b).

3.3.2 Geometrisch-optische Modelle

Im direkten Kontrast zum Ansatz der trüben Medien beschreiben die geometrisch-optischen Modelle das Reflexionsvermögen von Vegetationsbeständen mittels diskreter Objekte. Der Bestand besteht dabei aus einer Vielzahl dreidimensionaler (3D) geometrischer Grundformen (z.B. Zylinder, Kugeln, Kegel, Ellipsoide), die in einer bestimmten Weise auf einem Bodengrund angeordnet sind. Durch Anwendung der parallelen Strahlengeometrie bei der Beleuchtung der Szene lassen sich auf den Objekten beleuchtete A_C und schattige A_T Flächen bestimmen sowie für den Bodengrund A_G und A_Z (Li und Strahler, 1985). Das Reflexionsvermögen R ergibt sich dann aus der flächenmäßig gewichteten Summe der verschiedenen besonnenen und beschatteten Flächen, multipliziert mit dem jeweiligen Reflexionsfaktor.

$$R = \frac{A_G G + A_C C + A_Z Z + A_T T}{A} \quad , \quad (3.2)$$

wobei G, C, Z, T der Reflexionsfaktoren für das entsprechende Material sind und A die gesamte betrachtete Fläche ist. Variationen von R ergeben sich dann durch unterschiedliche Objektdichte und -größe. Die Reflexionsfaktoren der jeweiligen Flächen werden meist aus Luftbild- bzw. Satellitenbilddaten oder im selteneren Fall bei Feldmessungen bestimmt. Die Flächen $A_{C,T,G,Z}$ können je nach verwendeter Grundform unter Berücksichtigung der Beleuchtungsrichtung bestimmt werden. So ergeben sich z.B. für den Nadirblick die beleuchtete A_C und die schattige Fläche A_T eines Kegels mit dem Radius r , wie sie von Li und Strahler (1985) verwendet wurden zu

$$A_C = r^2 (\pi + 2\gamma) \quad , \quad A_T = r^2 (\pi - 2\gamma) \quad , \quad (3.3)$$

sowie die auf dem Bodengrund beschattete Fläche A_Z durch den Kegel zu

$$A_Z = r^2 \left(\cot \gamma + \gamma - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.4)$$

mit

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \theta_i} \right) \quad . \quad (3.5)$$

Die ersten Modelle nutzten rein opake Objekte (z.B. Norman und Welles, 1983 und Li und Strahler, 1985). Weiterentwicklungen führten zunächst zur Einbeziehung der Transmission (Li und Strahler, 1986), indem ein Abschwächungsfaktor als Funktion von der Pfadlänge durch ein Objekt bestimmt wird, der für eine korrigierte Berechnung der abgeschatteten Bodengrundfläche genutzt wird (Förster et al., 2010). Der Bedarf, die spektrale Komponen-

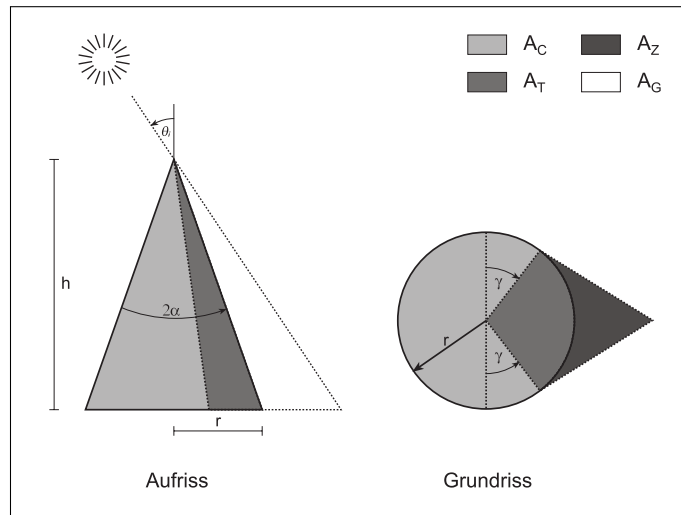


Abb. 3.9 – Geometrie eines beleuchteten Kegels und die daraus resultierenden Schattenflächen (nach Li und Strahler, 1985).

te einzubeziehen, führte zur Kombination des geometrisch-optischen Ansatzes mit dem der trüben Medien. Dabei wird angenommen, dass die Objekte aus solchen bestehen. Das Strahlungsverhalten innerhalb der Objekte wird mit einem Strahlungstransfermodell beschrieben und die Schatteneffekte auf Bestandsebene durch geometrisch-optische Prinzipien (Hybridmodell). Ein solches Hybridmodell kombiniert somit die Vorteile des geometrisch-optischen Ansatzes, die diskrete Beschreibung heterogener Vegetationsbestände und damit verbundener Effekte (Schattenwurf und *Hotspot*) mit denen des Strahlungstransferansatzes, die Mehrfach- und Volumenstreuung innerhalb der Objekte. Goel und Grier (1988) z.B. modellierten das Reflexionsvermögen heterogener Vegetationsbestände durch Nutzung eines Hybridmodells. Chen und Leblanc (1997) entwickelten ein erweitertes Hybridmodell, indem neben der heterogenen Verteilung der Baumobjekte auch noch eine heterogene Verteilung kleinerer, mit trüben Medien gefüllte, diskrete Objekte innerhalb eines Baumes angenommen wird. Weitere Beispiele sind unter anderem in Liang (2004) und Chen et al. (2000) zu finden.

3.3.3 Computergraphische Modelle

Während die bisher vorgestellten Modelle einen Vegetationsbestand abstrakt beschreiben, nutzen Computersimulationsmodelle detaillierte 3D-Modelle von Einzelpflanzen, die aus zahlreichen geometrischen Grundelementen (Dreiecke, Zylinder, Kugeln u.a.) bestehen. Zu mehreren auf einem Bodengrund angeordnet beschreiben sie einen Vegetationsbestand. Die spektrale Beschreibung erfolgt über Attribute, die jedem geometrischen Grundelement zugewiesen sind. Unter Angabe der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie sowie mit Hilfe einer Methode zur Lösung des Strahlungstransfers und der Strahlungsinteraktion zwischen den einzelnen Objekten der Szene ist es möglich, das Rückstrahlungsvermögen eines Vegetationsbestands sehr genau zu simulieren.

Hierfür eignen sich am besten die Methoden der globalen Beleuchtung, die auf der sogenannten Rendergleichung (engl. *light transport equation*) von J. T. Kajiya basieren. Die Rendergleichung (Gl. 3.6) beschreibt die Energieerhaltung bei der Ausbreitung von Lichtstrahlen

innerhalb einer Szene (Kajiya, 1986), d.h. bei der Bestimmung des Reflexionsvermögens an einem Flächenstück wird die Gesamtheit der einfallenden Strahlung einbezogen. Sie besagt: In jedem Punkt $p(x, y, z)$ der Szene ergibt sich somit die in Richtung $\vec{\omega}_v$ abgestrahlte Strahldichte $L(p, \vec{\omega}_v)$ aus der emittierten Strahlung $L_e(p, \vec{\omega}_v)$ (falls der Punkt selbst eine Strahlungsquelle darstellt) und der einfallenden Strahlung $L_i(p, \vec{\omega}_i)$, die im Punkt p in Richtung $\vec{\omega}_v$ reflektiert wird.

$$L(p, \vec{\omega}_v) = L_e(p, \vec{\omega}_v) + \int_{\Omega_p} L_i(p, \vec{\omega}_i) f_r(p, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_v) \cos(\vec{n}_p, \vec{\omega}_i) d\vec{\omega}_i, \quad (3.6)$$

wobei $f_r(p, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_v)$ die Reflexionsfunktion, \vec{n}_p die Normale des Flächenstücks im Punkt p und Ω_p die Gesamtheit aller Winkel der Hemisphäre über Punkt p ist. Eine numerische Lösung dieses Integrals ist nicht möglich.

3.3.3.1 Raytracing

Das Raytracing hat seinen Ursprung in der 3D-Computergraphik, wo es zur Abbildung von 3D-Szenen genutzt wird. Die Grundidee des Raytracings ist die Verfolgung eines Strahls von der Strahlungsquelle durch eine Szene bis hin zum Sensor. Dabei kann der Strahl reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Das konventionelle Raytracing basiert auf idealer Spiegelung (bei Reflexion) und Brechung (bei Transmission). Da nur wenige der losgeschickten Strahlen im Sensor ankommen, nutzt man die Reziprozität der Strahlung, das die Umkehrung der Verfolgungsrichtung erlaubt und den Rechenaufwand erheblich mindert. Die Strahlen werden nun aus dem Sensor durch jedes Pixel einer Abbildungsebene in die Szene geschickt und solange verfolgt, bis sie kein Objekt mehr schneiden oder ein Abbruchkriterium (z.B. maximale Anzahl an Strahlungsinteraktionen) erreicht ist. Dadurch ist das Raytracing ein blickpunktabhängiges Verfahren. Bei jedem Schnittpunkt werden Strahlen in Richtung der Lichtquelle geschickt. Schneiden diese unterwegs ein Objekt der Szene, so liegt der Ausgangspunkt im Schatten. Falls nicht, so wird die an dem Punkt p vorliegende Strahlungsintensität I_p wie folgt bestimmt:

$$I_p = I_i \rho_p \cos \theta_n, \quad (3.7)$$

wobei I_i die Strahlungsintensität der eintreffenden Strahlung, ρ_p der Reflexionsfaktor des Flächenstücks im Punkt p und θ_n der Winkel zwischen Zenit der Beleuchtungsrichtung und der Flächennormale ist. Anschließend werden die Richtungen für die Reflexion und die Transmission bestimmt und neue Strahlen losgeschickt. Falls diese Strahlen wieder Objekte schneiden, beginnt der Prozess von neuem. Ist die Verfolgung eines Strahls abgeschlossen, werden die lokalen Intensitäten entsprechend gewichtet und aufsummiert und ergeben somit die Gesamtintensität des Pixels (Weidenbacher, 2002).

Beim konventionellen Raytracing wird die global diffuse Strahlung nicht berücksichtigt. Es findet also keine Beleuchtung durch andere diffuse Flächen der Umgebung statt. Für die Simulation von Vegetationsbestandsreflexion ist die diffuse Beleuchtung jedoch ein wichtiger Faktor. Das Monte-Carlo-Raytracing (MCRT) stellt eine Erweiterung der konventionellen Raytracing-Methode dar. Es implementiert die diffuse Wechselwirkung, indem mehrere Strahlen durch jedes Pixel geschickt werden. Beim Schnitt mit einem Objekt wird im Gegensatz zum konventionellen Raytracing nur ein Strahl rekursiv weiter verfolgt, der entweder ein gespiegelt reflektierter, ein transmittierter oder ein diffus reflektierter Strahl ist. Welcher davon

weiter verfolgt wird, wird stochastisch nach den Regeln der Monte-Carlo-Simulation ermittelt mit dem Ziel, die Rendergleichung so gut wie möglich anzunähern. Die einfachste Methode hierfür ist, den Mittelwert der Intensitäten der losgeschickten Strahlen mit Hilfe zufälliger Stichproben des Integranden zu berechnen. Ein Nachteil der Monte-Carlo-Integration ist die sichtbare Varianz der Lösung, die als Rauschen wahrgenommen wird (siehe Abb. 3.10). Je mehr Strahlen jedoch pro Pixel ausgesendet werden, d.h. je mehr Stichproben erhoben werden, um so mehr nähert sich die Lösung dem exakten Ergebnis des Integrals (Kajiya, 1986). Für die fernerkundliche Anwendung wird das Ergebnis über einem bestimmten räumlichen Ausschnitt der Szene integriert. Für realistische Ergebnisse empfiehlt es sich, eine größere Szene aufzubauen, als man abtasten will. Damit wird gesichert, dass vor allem die diffuse Strahlung und, speziell bei Vegetationsbeständen, die Volumenstreuung vollständig einbezogen wird.

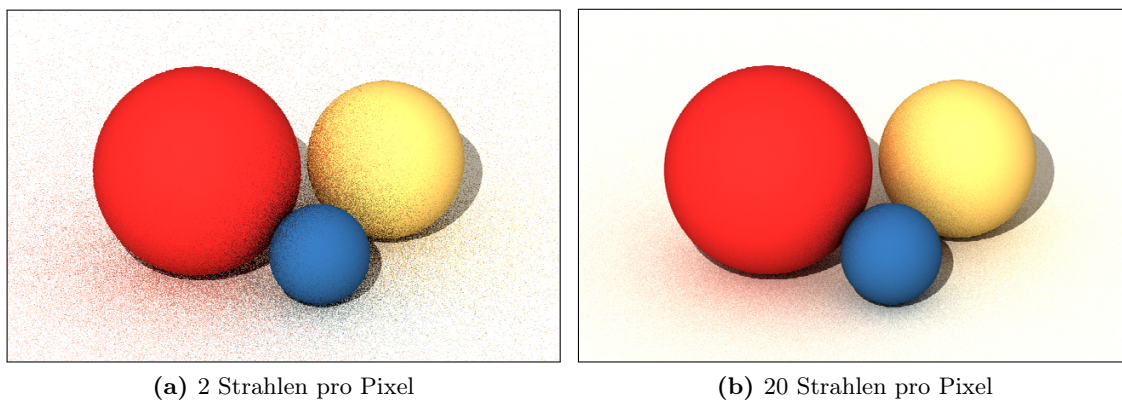


Abb. 3.10 – Kugelszene mit MCRT jeweils mit (a) 2, und mit (b) 20 Strahlen pro Pixel gerendert. Mit zunehmender Zahl an Strahlen pro Pixel verringert sich das Bildrauschen. Sichtbar ist die diffuse Beleuchtung durch Reflexion an den farbigen Kugeln auf umgebene Flächen.

In der Fernerkundung sind bereits viele Raytracing-Methoden für die Simulation von Vegetationsbestandsreflexion entwickelt worden (z.B. Ross und Marshak, 1988; North, 1996; Govaerts, 1996; Lewis und Muller, 1992). Dabei sind viele Modelle speziell für die Validation von Strahlungstransfermodellen (z.B. Govaerts, 1996) oder von einfachen physikalisch basierten Modellen (z.B. Chelle und Andrieu, 1999) entwickelt worden. Die meisten jedoch sind wegen des Strebens nach immer exakteren Modellierungsergebnissen zur Charakterisierung des Reflexionsvermögens von Vegetationsbeständen entwickelt worden, vor allem im Hinblick auf das bessere Verständnis der BRDF. Einige dieser Modelle sind: DART (Gastellu-Etchegorry et al., 1996), Drat (Lewis, 1999), RAYTRAN (Govaerts und Verstraete, 1998), Rayspread (Widlowski et al., 2006), Sprint3 (Thompson und Goel, 1998) und FLIGHT (North, 1996).

Raytracing ist das rechenintensivste Verfahren zur Simulation von Bestandsreflexion, gerade wegen der Möglichkeit, die Pflanzen und somit die Bestände sehr detailliert und komplex zu beschreiben. Doch gegenüber den anderen physikalisch basierten Modellen zur Simulation von Bestandsreflexion (Turbid-Medium-Modelle, Geometrische-Optik-Modelle, Hybridmodelle) erreichen sie, verglichen mit den in der Realität gemessenen Werten, wesentlich bessere Ergebnisse (Förster et al., 2010).

3.3.3.2 Radiosity

Das Radiosity-Verfahren hat seinen Ursprung in der Wärmetechnik. Goral et al. (1984) adaptierte deren Methoden für die Computergraphik um realistische Szenen mit diffus reflektierenden Oberflächen zu generieren. Das Grundprinzip des Radiosity-Verfahrens ist die Erhaltung der Strahlungsenergie in einer geschlossenen Szene. Es wird ein Gleichgewicht zwischen zugeführter Strahlungsenergie und absorbierte Strahlungsenergie angenommen (vgl. Rendergleichung: Gl. 3.8). Weiterhin wird angenommen, dass alle Objekte ideal diffus reflektieren (Lambertscher Reflektor) bzw. emittieren (Lambertsche Strahler). Unter dieser Annahme kann die Rendergleichung in die allgemeine Radiosity-Gleichung überführt werden. Dabei wird, anstatt über alle Einfallsrichtungen, von denen die Fläche i angestrahlt werden kann, über alle Flächen A_i der Szene, die Strahlung emittieren oder reflektieren können, integriert. Da die BRDF f_r von Lambertschen Oberflächen unabhängig von der Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung ist (siehe Kap. 2.3), kann sie durch den Reflexionsfaktor ρ_i der Fläche i ersetzt werden (Liang, 2004).

$$B_i dA_i = E_i dA_i + \rho_i \int_{A_i} B_j F_{dA_j \rightarrow dA_i} dA_i \quad , \quad (3.8)$$

wobei B_i bzw. B_j die gesamte abgegebene Strahlung der Fläche i bzw. j , E_i die von der Fläche i emittierte Strahlung und $F_{dA_j \rightarrow dA_i}$ der Formfaktor zwischen Fläche j und i ist. Eine numerische Lösung ist auch bei diesem Integral nicht möglich. Deshalb wird diskretisiert. Anstatt infinitesimal kleine Teilflächen dA_i zu betrachten, wird die Szene in viele kleine Flächen zerlegt. Jede dieser Flächen kann nun Strahlung emittieren und reflektieren, wobei die Emission für jede Fläche homogen und der Reflexionsgrad konstant ist (Cohen und Wallace, 1993). Es ergibt sich somit die klassische Radiosity-Gleichung:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j^n B_j F_{ji} \quad . \quad (3.9)$$

Die Strahlungsintensität der Fläche i ergibt sich aus deren Emissionsintensität E_i und der Summe aus der Strahlungsintensität aller anderen in der Szene vorhandenen Flächen in Abhängigkeit vom jeweiligen Formfaktor F_{ji} und vom eigenen Reflexionsfaktor ρ_i . Diese Gleichung wird für alle Flächen der Szene aufgestellt und führt zu einem linearen Gleichungssystem (LGS). Die Lösung gibt dann die Strahlungsintensität für jedes Flächenstück an, bei der ein Gleichgewicht der Strahlung innerhalb der Szene herrscht (Weidenbacher, 2002). Anschließend erfolgt die Abbildung in die Bildebene.

Der Formfaktor F_{ji} beschreibt den Anteil der von der Fläche j abgegebenen Strahlung, der auf der Fläche i ankommt. Er ist abhängig von den Lagebeziehungen der Flächen, wie z.B. Überdeckungen durch andere Objekte der Szene. Für die Bestimmung der Formfaktoren gibt es verschiedene Möglichkeiten (siehe Cohen und Wallace, 1993). Eine Möglichkeit ist die Projektion der Fläche A_j auf eine Halbkugel mit dem Radius eins um den Mittelpunkt von A_i . Anschließend wird diese Fläche orthogonal auf die Kreisfläche projiziert. Der Formfaktor entspricht dann dem Quotienten aus der projizierten Fläche von A_j und der Kreisfläche, in diesem Fall π (Nusselt, 1928).

Beim konventionellen Radiosity-Verfahren wird die Transmission nicht berücksichtigt. Ei-

ne Erweiterung des Verfahrens ermöglicht auch die Berücksichtigung diffus transmittierender Strahlung und somit die Eignung für die fernerkundliche Anwendung (Borel et al., 1991). Die Radiosity-Gleichung erhält einen zusätzlichen Strahlungsanteil, der auf der Rückseite jeder Fläche einstrahlt (Cohen und Wallace, 1993):

$$B_i = E_i + \sum_j^n (\rho_i B_j F_{ij} + \tau_i B_j F_{kj}) \quad , \quad (3.10)$$

wobei τ_i der diffuse Transmissionsfaktor der Fläche i ist. Die Fläche k entspricht dabei der Rückseite von Fläche i . Der Formfaktor F_{kj} wird also zwischen der Fläche j und der Rückseite der Fläche i bestimmt. Die Anzahl n der Flächen enthält die Vorder- und Rückseiten der transmittierenden Flächen, die separat betrachtet werden. Wie auch beim Raytracing muss das erzeugte Ergebnisbild über einem bestimmten räumlichen Bereich integriert werden, um den Bestandsreflexionsfaktor zu erhalten.

Gegenüber dem Raytracing hat das Radiosity-Verfahren einen entscheidenden Vorteil. Es ist blickpunktunabhängig. Das bedeutet, dass eine Szene, die mit Radiosity generiert wurde, ohne großen rechnerischen Aufwand aus verschiedenen Blickwinkeln abgebildet werden kann. Die Berechnung der Formfaktoren ist jedoch viel aufwendiger als das Raytracing von nur einer Blickrichtung. Trotz vereinfachter Methoden, z.B. das Hemicube-Verfahren von Cohen und Greenberg (1985), ist die Formfaktorenberechnung immer noch sehr rechenintensiv. Ein Nachteil ist, dass bei Radiosity-Verfahren nur der diffuse Strahlungsteil berücksichtigt wird.

Heute zählt Radiosity neben dem Raytracing zu den wichtigsten Methoden der Computergraphik zur Abbildung von 3D-Szenen. Daruf basierend sind in der Fernerkundung viele Methoden für die Simulation von Vegetationsbestandsreflexion entwickelt worden (z.B. Goel et al., 1991; Borel et al., 1991; García-Haro et al., 1999 und Qin und Gerstl, 2000). Borel und Gerstl (1993) nutzten das Radiosity-Verfahren zur Simulation von Reflexionsspektren und BRDF geometrisch einfacher Vegetationsbestände. García-Haro et al. (1999) berechneten die BRDF von heterogenen Vegetationsbeständen, bestehend aus geometrisch einfachen Pflanzen. Bei der Bestimmung der Formfaktoren wurden hier die Bestandsstrukturparameter einbezogen, um den Rechenaufwand zu verringern. Qin und Gerstl (2000) verwendeten komplexe 3D-Bestände heterogener Steppenvegetation zur Simulation von Bestandsreflexion. Vergleiche mit in situ gemessenen Daten auf drei Skalenniveaus (am Boden, von einer Plattform, vom Satelliten) ergaben gute Übereinstimmungen auf allen Niveaus. Sie zeigten damit, dass detaillierte 3D-Pflanzenmodelle in Kombination mit computergraphischen Methoden sehr gut für die Simulation von Bestandsreflexion bei allen Skalen geeignet sind.

3.3.4 Fazit

Es sind drei Ansätze zur Simulation von Vegetationsbestandsreflexion vorgestellt worden, die in Abb. 3.11 hinsichtlich ihrer Bestandsbeschreibung vergleichend dargestellt sind. Die Strahlungstransfermodelle beschreiben die Vegetation als trübes Medium. Durch Erweiterungen ist es möglich, die Bestandstruktur einzubeziehen, jedoch lediglich Bestandsdichte durch LAI und Blattorientierung durch LAD. Die Modelle der trüben Medien ermöglichen deshalb nur die Betrachtung homogener, relativ dichter Bestände. Die geometrisch-optischen Modelle beschreiben die Vegetation als eine Komposition von Einzelpflanzen, repräsentiert

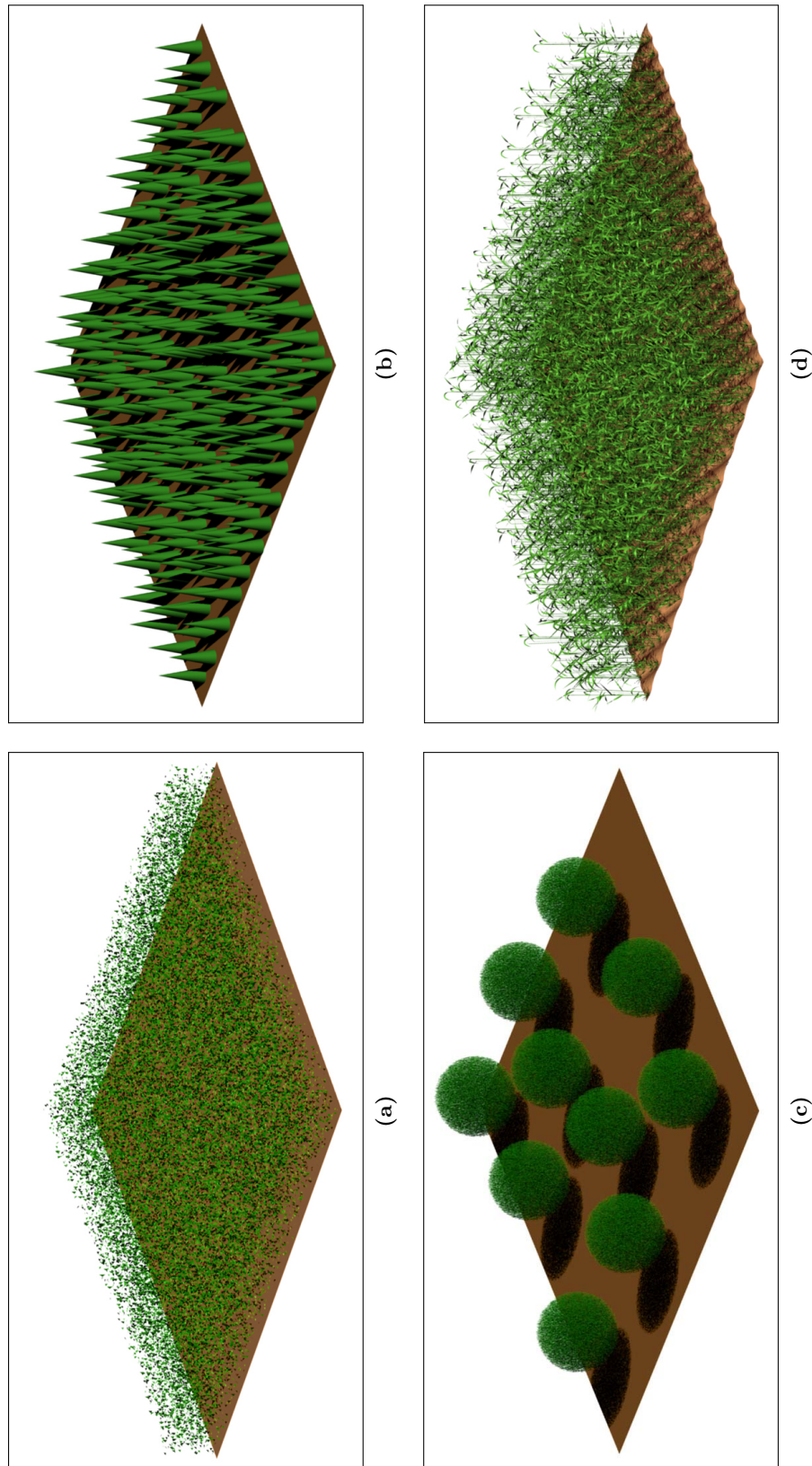


Abb. 3.11 – Vergleich der Bestandsdarstellung der verschiedenen Ansätze zur Simulation von Vegetationsbestandsreflexion. (a) Strahlungs-transfermodell mit Vegetationsbestand als trübes Medium, (b) einfaches geometrisch-optisches Modell mit opaken Einzelpflanzen, hier aus Kegeln auf einfachem Bodengrund, (c) hybrides geometrisch-optisches Modell mit Einzelpflanzen, hier aus Kugeln gefüllt mit trübem Medium und (d) Computersimulationsmodell mit detaillierten Einzelpflanzen und Bodengrund.

durch dreidimensionale geometrische Grundformen. Sie eignen sich für die Betrachtung lichter Vegetationsbestände mit gleichmäßig geformter Erscheinung. Ein Nachteil ist die Herleitung der spektralen Charakteristika für die einzelnen Flächen. Durch die Kombination eines geometrisch-optischen Modells mit einem Strahlungstransfermodell ist es möglich, die Vorteile beider Ansätze zu nutzen. Für Analysen bezüglich der Bestandsstruktur sind diese Ansätze allerdings nicht geeignet, da sie die Bestands- und Pflanzenstruktur nicht ausreichend beschreiben. Die computergraphischen Modelle beschreiben die Vegetation sehr detailliert. Der große Vorteil der expliziten 3D-Darstellung der Geometrie ist, dass jedes Objekt innerhalb eines Vegetationsbestandes in jedem erforderlichen bzw. geeigneten Detaillierungsgrad dargestellt werden kann (hohe Flexibilität). Damit eignen sich die computergraphischen Modelle für Untersuchungen zum Einfluss von Bestands- und Pflanzenarchitektur auf das Reflexionsvermögen von Vegetationsbeständen. Ein Nachteil ist, dass die direkte Invertierung computergraphischer Modelle wegen der fehlenden Eineindeutigkeit nicht möglich ist. Auf indirektem Weg hingegen, macht die Entwicklung verschiedener LUT-Methoden die Invertierung biophysikalischer Information zunehmend machbar (Saich et al., 2003). Das noch laufende Vergleichsprojekt RAMI (*RA*diation *T*ransfer *M*odel *I*ntercomparison) (RAMI-1: Pinty et al., 2001; RAMI-2: Pinty et al., 2004; RAMI-3: Widlowski et al., 2007), dessen Ziel es ist, die Stärken und Schwächen der verschiedenen Reflexionssimulationsmodelle zu manifestieren, ergab ebenfalls eine hohe Flexibilität der MCRT-Modelle hinsichtlich der Bestandsbeschreibung. Der Vergleich der Ergebnisse der teilgenommenen Modelle (jede vorgestellte Modellart war vertreten) ergab eine gute Übereinstimmung miteinander, jedoch wurden bis jetzt nur einfache Vegetationsbestände modelliert, so dass die Stärke der computergraphischen Modelle – die Möglichkeit Vegetation explizit und realitätsnah zu beschreiben – gegenüber den einfacheren Modellen noch nicht in den Vordergrund treten konnte. Zur Zeit läuft die vierte Phase des Projekts, wobei auch detaillierte 3D-Modelle von Baumbeständen einbezogen werden.

3.4 Vegetationsindizes

Wie in Abschn. 3.1 erörtert, beeinflussen viele Faktoren das Reflexionsvermögen von Vegetationsflächen. Das Hauptproblem liegt dabei in der gegenseitigen Überlagerung dieser, womit eine eindeutige Erfassung der Vegetationscharakteristika erschwert wird. Aus diesem Grund sind seit dem Aufkommen der Fernerkundung zahlreiche Vegetationsindizes entwickelt worden. Deren Hauptaufgaben sind (Huete, 1989; Baret und Guyot, 1991; Bannari et al., 1995; Klisch, 2003):

- Minimierung des Bodeneinflusses,
- Minimierung des Einflusses der Aufnahmegeometrie,
- Minimierung des Atmosphäreneinflusses,
- Minimierung des Einflusses von Pflanzen- und Bestandsarchitektur,
- Maximierung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich der grünen Vegetation,
- globale Anwendbarkeit.

Vegetationsindizes sind somit eine gefilterte Informationsquelle, die sich vor allem für die quantitative Ableitung verschiedener Vegetationsparameter eignen (z.B. LAI ¹, Chlorophyll ², photosynthetisch aktive Strahlung ³ und Biomasse ⁴). Sie können auf vielfältige Arten bestimmt werden. Am häufigsten werden Indizes verwendet, die auf einfachen Berechnungen basieren wie Ratios oder Differenzen (z.B. *Simple Ratio* SR (Jordan, 1969), *Difference Vegetation Index* DVI (Jordan, 1969), und *Normalized Difference Vegetation Index* NDVI (Rouse et al., 1974)). Für die Reduzierung des Einflusses verschiedener Böden sind die einfachen Vegetationsindizes modifiziert oder erweitert wurden (z.B. *Soil Adjusted Vegetation Index* SAVI (Huete, 1988), *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* MSAVI (Qi et al., 1994), *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* OSAVI (Rondeaux et al., 1996), *Renormalized Difference Vegetation Index* RDVI (Roujean und Breon, 1995)). Da bei vielen dieser Indizes bei Vegetationsbeständen mit zunehmend höheren LAI-Werten (z.B. bei Getreide: > 3) eine Sättigung auftritt, d.h. es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Index und LAI mehr erkennbar, wurden Indizes entwickelt, die einen breiteren Wertebereich abdecken (z.B. *Wide Dynamic Range Vegetation Index* WDRVI (Gitelson, 2004)). Mit dem Aufkommen der Spektroskopie ergaben sich neue Möglichkeiten, so dass viele schmale Bänder einbezogen werden konnten, z.B. durch Differentiation oder Integration der Reflexionskurve um daraus wiederum Indizes abzuleiten (z.B. lokales Maximum der ersten Ableitung im Bereich der *Red-Edge* dRE (Filella und Penuelas, 1994) und *Reflectance Integral Index* RII (Gitelson und Merzylak, 1994)) oder die Bestimmung des *Red-Edge* Wendepunktes mit einer invertierten Gaußkurve (Miller et al., 1990). Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Vegetationsindizes für die verschiedensten Anwendungen. Zum Beispiel geben Elvidge und Chen (1995) einen Vergleich zu verschiedenen breit- und schmalbandigen Vegetationsindizes basierend auf rot und NIR-Bändern und le Maire et al. (2004) vergleichen alle von 1973 bis 2002 bezüglich der Chlorophyllableitung veröffentlichten Vegetationsindizes (62 Indizes sind aufgelistet) hinsichtlich ihrer Ableitungsgenauigkeit und Übertragbarkeit auf andere Spezies. Außerdem geben Hatfield et al. (2008) einen guten Überblick zu Vegetationsindizes, die bei der Fernerkundung von Agrarflächen verwendet werden.

Es folgt eine Auflistung der in der Arbeit in Kap. 5 und 6 verwendeten Vegetationsindizes. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet gebräuchliche und möglichst bereits operationell verwendete Vegetationsindizes zu verwenden. Außerdem sind nur Vegetationsindizes, die auf rot und NIR-Bändern basieren, ausgewählt wurden um den Rechenaufwand zu beschränken (siehe dazu Abschn. 4.1.2).

SR: *Simple Ratio* (Jordan, 1969)

$$SR = \frac{R_{NIR}}{R_{rot}} \quad (3.11)$$

¹z.B. Jordan, 1969; Baret und Guyot, 1991; Chen und Cihlar, 1996; Gitelson, 2004

²z.B. Curran et al., 1991; Gitelson und Merzylak, 1994; Roujean und Breon, 1995; Blackburn, 1998

³z.B. Baret und Guyot, 1991; Wiegand et al., 1991; Goward und Huemmrich, 1992

⁴z.B. Jordan, 1969; Anderson et al., 1993; Huete et al., 2002; Hansen und Schjoerring, 2003

MSR: *Modified Simple Ratio* (Chen, 1996)

$$MSR = \frac{\frac{R_{NIR}}{R_{rot}} - 1}{\sqrt{\frac{R_{NIR}}{R_{rot}} + 1}} \quad (3.12)$$

DVI: *Difference Vegetation Index* (Jordan, 1969)

$$DVI = R_{NIR} - R_{rot} \quad (3.13)$$

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse et al., 1974)

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{rot}}{R_{NIR} + R_{rot}} \quad (3.14)$$

RDVI: *Renormalized Difference Vegetation Index* (Roujean und Breon, 1995)

$$RDVI = \frac{R_{NIR} - R_{rot}}{\sqrt{R_{NIR} + R_{rot}}} \quad (3.15)$$

OSAVI: *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (Rondeaux et al., 1996)
(SAVI mit $L = 0,16$)

$$OSAVI = \frac{1,16 (R_{NIR} - R_{rot})}{R_{NIR} + R_{rot} + 0,16} \quad (3.16)$$

MSAVI: *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (Qi et al., 1994)

$$MSAVI = 0,5 \left(2 R_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 R_{NIR} + 1)^2 - 8 (R_{NIR} - R_{rot})} \right) \quad (3.17)$$

WDRVI: *Wide Dynamic Range Vegetation Index* (Gitelson, 2004)

$$WDRVI = \frac{0,12 R_{NIR} - R_{rot}}{0,12 R_{NIR} + R_{rot}} \quad (3.18)$$

R_{rot} : Zentrumswellenlänge und FWHM des spektralen Bandes zwischen 650 nm - 680 nm

R_{NIR} : Zentrumswellenlänge und FWHM des spektralen Bandes zwischen 780 nm - 840 nm

4 Spektrale Simulation – Vom virtuellen Getreidebestand zum sensorspezifischen Reflexionssignal

Die Simulation künstlicher Sensordaten ist ein nützliches Instrument zur Vorbereitung neuer Fernerkundungsmissionen. Derartige Daten bieten eine geeignete Grundlage für die Entwicklung neuer Auswertalgorithmen.

Das Monitoring von Landwirtschaftsflächen ist eines der Kernthemen der zukünftigen EnMAP Mission (Kaufmann et al., 2005). Die Simulation multitemporaler Reflexionsdaten, die durch variierende Aufnahmegeometrien und Pflanzenphänologie charakterisiert sind, ist dabei von sehr hohem Interesse. In dieser Arbeit wurde deshalb ein spektrales, räumliches und zeitliches Modell zur Simulation von Vegetationsbestandsreflexionen entwickelt, das in Abschn. 4.1 vorgestellt wird. In einem weiteren Schritt werden die bodennahen (engl. *bottom of atmosphere*, BOA) Bestandsreflexionen durch eine End-to-End Sensorsimulation in sensorspezifische Reflexionsspektren umgewandelt (Abschn. 4.2).

4.1 Simulation bodennaher Bestandsreflexion

Das Zusammenspiel optischer und struktureller Eigenschaften von Pflanzen und Boden führt in Vegetationsbeständen zu sehr komplexen Strahlungsinteraktionen (siehe Abschn. 3.1). Die Untersuchung des Einflusses von Pflanzen- und Bestandsstruktur auf das Bestandsreflexionssignal gehört aktuell zu den Hauptaufgaben in der Fernerkundung (Lewis, 1999). Die moderne Computergraphik bietet die Möglichkeit der detaillierten Beschreibung von Vegetationsbeständen mittels 3D-Modellen. Gekoppelt mit einem adäquaten Modell zur Simulation der Strahlungsinteraktion ermöglicht dieses System, realitätsnah die Einflüsse der Pflanzen- und Bestandsstruktur auf das Bestandsreflexionssignal zu studieren. Wie schon in Abschn. 3.3.4 erörtert, eignen sich die computergraphischen Modelle gut dafür, insbesondere Rückwärtsgerichtete Monte-Carlo Raytracing Verfahren. Von der Bildebene aus verfolgen sie den Strahlengang Pixel für Pixel, ähnlich dem Aufnahmeprinzip eines Sensors.

In dieser Arbeit wurden detaillierte virtuelle 3D-Getreidebestände modelliert und zur Bestimmung der Bestandsreflexion mit dem rückwärtsgerichteten Monte-Carlo Raytracing Verfahren Drat abgetastet. Abb. 4.1 zeigt das Flussdiagramm der Simulation. Es gibt einen Überblick zu den verschiedenen Daten (weiße Rechtecke) und Arbeitsschritten (graue Rauten) des gesamten Simulationssystems. Im Folgenden werden die verwendeten Daten und deren Prozessierung, die Generierung der 3D-Getreidebestände sowie die verwendete Raytracingsoftware detailliert beschrieben.

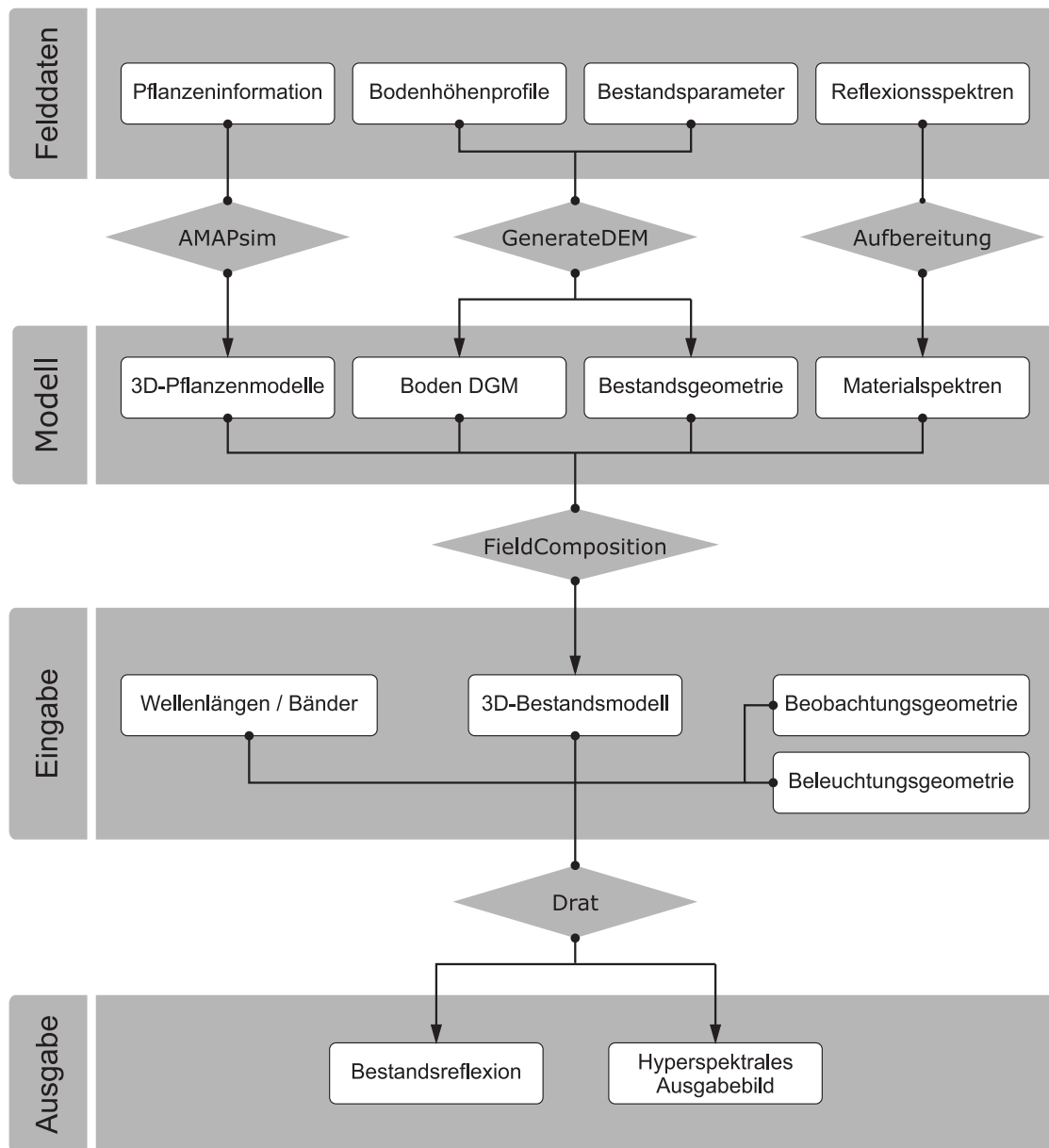


Abb. 4.1 – Flussdiagramm der spektralen Simulation von bodennaher Bestandsreflexion.

4.1.1 Aufbau des virtuellen Vegetationsbestandes

4.1.1.1 Datengrundlage

Die Daten wurden während der Vegetationsperioden 2006/2007, 2007/2008 und 2008/2009 in zwei verschiedenen Testgebieten in Brandenburg (Beelitz-Wittbrietzen und Berlin-Dahlem) gesammelt. Es wurden Spektralmessungen, Fotos und strukturelle Pflanzen- und Bestandsparameter in nahezu regelmäßigen Intervallen von Winterweizen (*Triticum aestivum*), Winterroggen (*Secale cereale*) und Wintergerste (*Hordeum vulgare*) aufgenommen.

Die Reflexionsmessungen wurden mit einem ASD FieldSpec Pro FR Spektroradiometer aufgenommen. Der Messbereich liegt zwischen 350 nm und 2500 nm und hat eine spektrale Auflösung von 3 nm (350 – 1000 nm) bzw. 10 nm (1001 – 2500 nm), welche auf 1 nm interpoliert wird. Alle Messungen wurden bei meist klarem wolkenfreien Himmel während des Sonnenhöchststands sowie ± 2 h aufgenommen. Gemessen wurde mit einer 8° Voroptyk im Abstand von ca. 1 m über den Pflanzen bei Bestandsmessungen und im Abstand von ca. 5 cm bei Messungen der einzelnen Pflanzenteile (Blatt, Stängel, Ähre). Jedes Objekt wurde mehrmals (5 – 10 mal) aufgenommen und gemittelt, um charakteristische Spektren zu gewährleisten. Wegen der Wasserdampfabsorption in der Atmosphäre wurden die Bänder in den Bereichen zwischen 1350 – 1420 nm, 1820 – 1940 nm und 2450 – 2500 nm maskiert und für die weitere Prozessierung ignoriert. Alle hier erwähnten spektralen Daten sind von D. Spengler aufgenommen, prozessiert und in einer Datenbank archiviert worden (Spengler, voraussichtlich 2011).

Da es nicht möglich war, während der Feldeinsätze die Transmission der Blätter zu messen, die aber für eine realistische Simulation der Bestandsreflexion notwendig ist, wurde diese für die einzelnen Blattspektren mittels PROSPECT berechnet. Für die Ableitung der Transmissionsspektren von frischen grünen Blättern wurde PROSPECT 5 (Jacquemoud und Baret, 1990; Féret et al., 2008) verwendet und für alte trockene Blätter eine Variante von PROSPECT 5 (F. Baret, persönlich kommuniziert, 2009), welche die spezifischen Absorptionskoeffizienten brauner Blattpigmente berücksichtigt. Es wurde eine Datenbank mit Reflexions- und Transmissionsspektren generiert, die alle für die drei Getreidearten möglichen Kombinationen der Blattinhaltsstoffe beinhaltet (ca. 5,6 Mio. frische Reflexions- und Transmissionsspektren, ca. 3 Mio. trockene Reflexions- und Transmissionsspektren). Zur Bestimmung des passenden Transmissionsspektrums wurden die im Feld gemessenen Reflexionsspektren mit denen in der Datenbank verglichen und das ähnlichste Spektrum bestimmt. Dafür wurde eine Kostenfunktion C_{LSN} (Gl. 4.1) zwischen modelliertem Reflexionsspektrum R_m und im Feld gemessenem Reflexionsspektrum R_f wie folgt aufgestellt:

$$C_{LSN} = \sum_{i=1}^{n_b} \left(\frac{R_{f_i} - R_{m_i}}{R_{f_i} + R_{m_i}} \right)^2, \quad (4.1)$$

wobei n_b für die Anzahl der spektralen Bänder steht. Die Kostenfunktion ist eine Funktion der kleinsten Quadrate (engl. *least square function*), die auf die Summe von modellierter und gemessener Reflexion normalisiert wird. Dadurch werden die Fehlerquadrate relativ zu den Reflexionswerten betrachtet und eine Bevorzugung der Bänder mit niedrigen Reflexionswerten gegenüber Bändern mit hohen Reflexionswerten wird vermieden. Für jedes gemessene Reflexionsspektrum wird die Kostenfunktion auf alle in der Datenbank enthaltenen, modellierten Reflexionsspektren angewendet. Der kleinste Wert von allen weist auf das modellierte Reflexionsspektrum, das dem Feldspektrum am ähnlichsten ist und dessen entsprechendes Transmissionsspektrum für die Simulation der Bestandsreflexion verwendet wird.

Die geometrischen und strukturellen Informationen der einzelnen Pflanzen und des gesamten Bestandes wurden einzeln von Hand aufgenommen. Jeder Pflanzenparameter wurde an vielen verschiedenen Pflanzen der entsprechenden Art gemessen, um charakteristische Werte zu erhalten. In Abb. 4.2 sind alle im Feld aufgenommenen Pflanzenparameter aufgelistet.

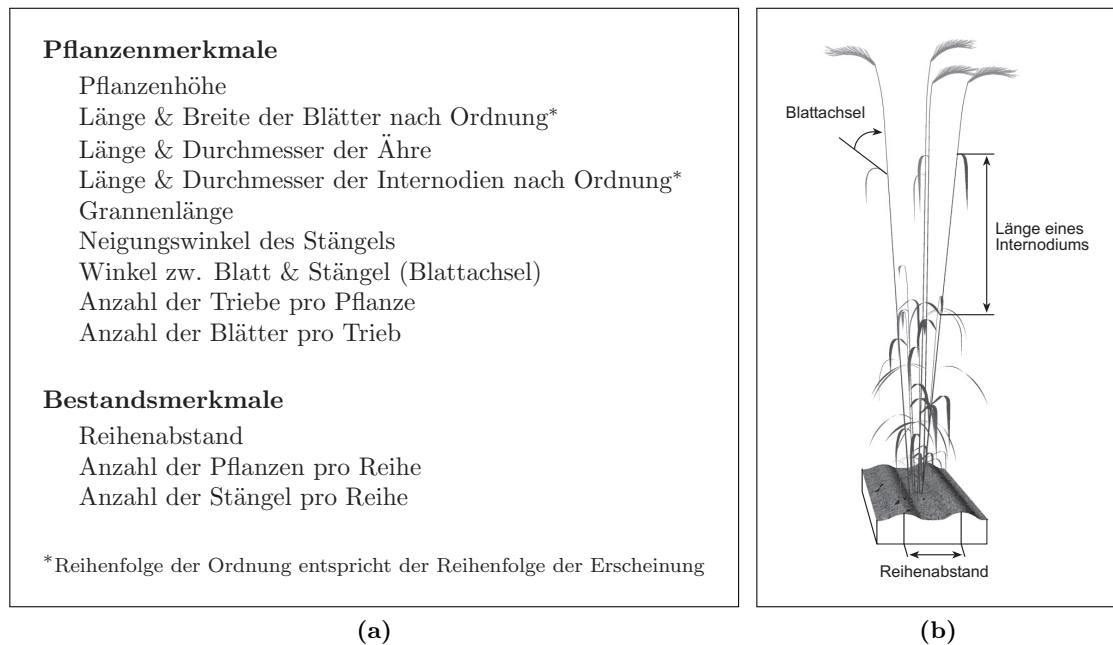


Abb. 4.2 – (a) Auflistung im Feld gemessener Pflanzen- und Bestandsmerkmale. (b) Ausgewählte Merkmale am Beispiel der Roggenpflanze. Abbildung generiert aus einer mit AMAPsim erzeugten 3D-Pflanze (Spengler, voraussichtlich 2011).

Neben den numerischen Daten wurde auch das Verhalten der Pflanze sowie der einzelnen Pflanzenteile während des Wachstums beobachtet. So biegt sich z.B. der Stängel mit zunehmender Ährengröße sowie auch die Ähre selbst. Weiteres spezifisches Wachstumsverhalten der Pflanzen zeigt sich bei der Bestockung der Pflanzen und bei der Entwicklung der Blätter. Aus dem Samen entwickelt sich zunächst ein Schössling mit einem Trieb, der ca. bis zum vierten Blatt austreibt. Anschließend setzt die Bestockung ein. Die neuen Triebe wachsen bis zum Entwicklungsstand des ersten Triebes, während dieser relativ langsam weiter wächst. Von diesem Stadium an setzt das Längenwachstum der Triebe ein. Dabei entwickeln sich alle Triebe der Pflanze in ähnlichem Tempo, das von den Wachstumsbedingungen abhängig ist (Witzenberger et al., 1989). Neue Blätter treiben zunächst relativ gerade und glatt aus und verdrehen sich anschließend schraubenähnlich. Mit zunehmendem Blattalter bildet sich die Verdrehung zurück und das Blatt biegt sich unter seiner eigenen Materiallast nach unten (siehe dazu auch Spengler (voraussichtlich 2011)).

Die Bestandsarchitektur ist zum einen durch die Pflanzen und zum anderen durch deren Anordnung auf dem darunter befindlichen Boden sowie durch den Boden selbst bestimmt. Der Boden von Getreidebeständen hat charakteristische Reihen mit jeweils gleichen Abständen, die beim Drillen der Saat entstehen. Zur Charakterisierung der Reihemuster wurden jeweils mehrere Höhenprofile quer zur Reihenstruktur aufgenommen und in einer Datenbank gesammelt.

4.1.1.2 Virtuelle Pflanzenmodelle

Die Güte von Strahlungstransfermodellen basierend auf Computersimulationsmodellen korreliert mit der Genauigkeit bzw. der Detailliertheit der verwendeten 3D-Objekte. Je genauer die virtuellen Pflanzen den natürlichen nachempfunden sind, um so genauer kann das Reflexionssignal wiedergegeben werden. Die für diese Arbeit verwendeten Pflanzen wurden von D. Spengler (Spengler, voraussichtlich 2011) mit AMAPsim (Barczy et al., 1997, 2008), einer wissenschaftlichen Software zur Erzeugung einer 3D-Darstellung von Pflanzen verschiedener Wachstumsstadien, erzeugt. Es basiert auf AMAP (botAnique et bioInforMatique de l'Architecture des Plantes) (De Reffye et al., 1988), einem Regelwerk zur Beschreibung von Pflanzenwachstum, welches die vierte Dimension abbildet. Durch Kalibration der entsprechenden Parameter ermöglicht AMAPsim die Simulation zahlreicher Pflanzenarten, womit es eine große Nutzerkreis anspricht. So wurden z.B. schon Sonnenblumen (Dosio et al., 2003), Mais (Yan et al., 2004), Schwarzkiefern (Castel et al., 2001) und Kokosnusspalmen (Mialet-Serra et al., 2001) modelliert. Auch für Reflexionsmodellierungen sind schon mit AMAPsim erstellte Pflanzen verwendet worden. Dauzat und Hautecoeur (1991) modellierten einen Hirsebestand zur Simulation bidirektionaler Bestandsreflexion mittels Monte-Carlo-Raytracing.

Für drei Getreidearten sind 3D-Pflanzen in jeweils 13 verschiedene Wachstumsstadien (WS) modelliert worden. Im Folgenden sind die 13 verwendeten Wachstumsstadien kurz erklärt und in den Abb. 4.3, 4.4 und 4.5 für alle drei Getreidearten dargestellt:

- 1: Blattentwicklung – einige wenige Blätter sind entfaltet
- 2: Bestockung – die ersten Bestockungstriebe sind sichtbar
- 3: Bestockung – alle Bestockungstriebe sind sichtbar
- 4: Schossen – Triebe sind aufgerichtet, Längenwachstum etwa beim 2. oder 3. Knoten angekommen
- 5: Schossen – Triebe sind fast ausgewachsen
- 6: Ährenschieben – Spitze der Ähre ist zu sehen, die untersten Blätter welken
- 7: Ährenschieben/Blüte – Ähre ist vollständig sichtbar
- 8: Fruchtentwicklung – die Ähren und Stängel biegen sich bei zunehmenden Gewicht der Ähre
- 9-10: Samenreife – weitere Blätter welken, die Ähren und Stängel biegen sich bei zunehmendem Gewicht der Ähre
- 11-13: Absterben – weitere Blätter welken, Ähre trocknet, die Ähren und Stängel biegen sich bei zunehmendem Gewicht der Ähre

Geometrisch gesehen bestehen die 3D-Modelle aus zahlreichen kleinen, ebenen Einzelflächen, meist Dreiecken (engl. *facets*). So besteht z.B. ein 3D-Roggenmodell im Wachstumsstadium 5 aus ca. 3000 und im Wachstumsstadium 11 aus ca. 55000 Einzelflächen. Der große Unterschied ist den Ähren mit den vielen Grannen zuzuschreiben, welche im Stadium 5 noch nicht entwickelt sind (vgl. Abb. 4.3). Die Entwicklung der Pflanzenmodelle war nicht Teil dieser Arbeit. Für eine detailliertere Beschreibung wird daher auf (Spengler, voraussichtlich 2011) verwiesen.



Abb. 4.3 – 3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien mit jeweils 3 voll entwickelten Stängeln für Wintergerste (Spengler, voraussichtlich 2011).

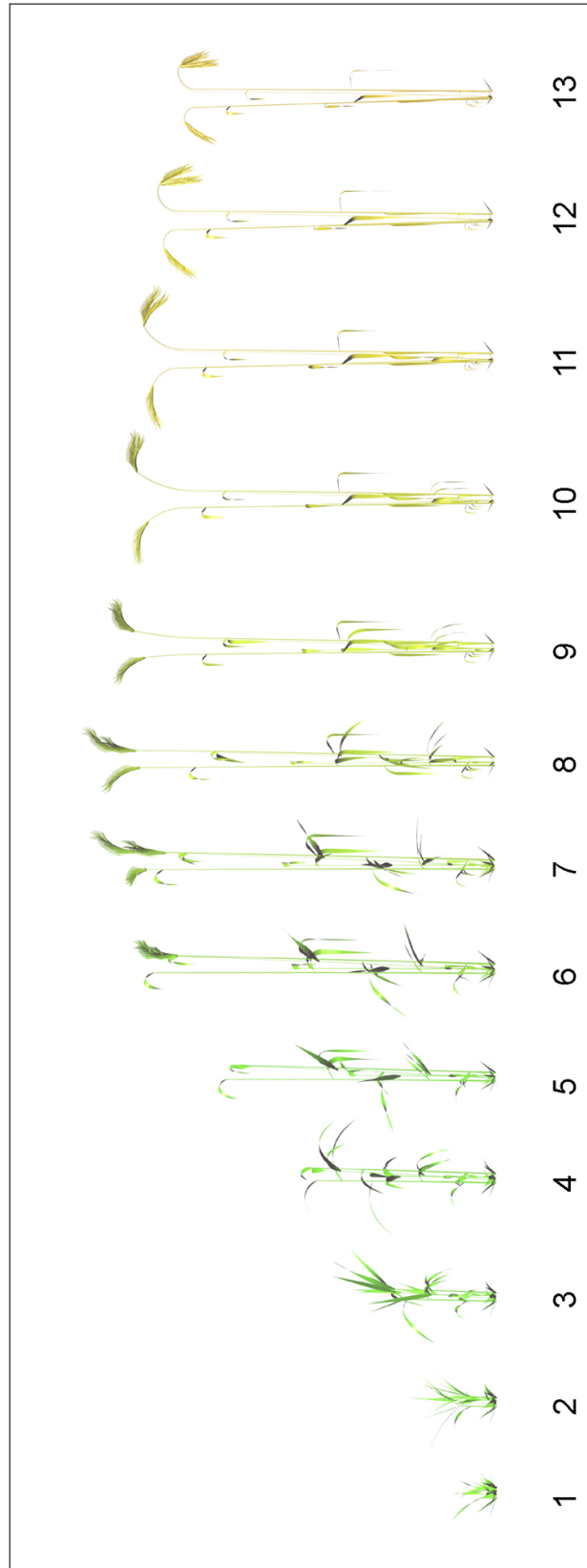


Abb. 4.4 – Die 3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien mit jeweils 3 voll entwickelten Stängeln für Winterroggen (Spengler, voraussichtlich 2011).

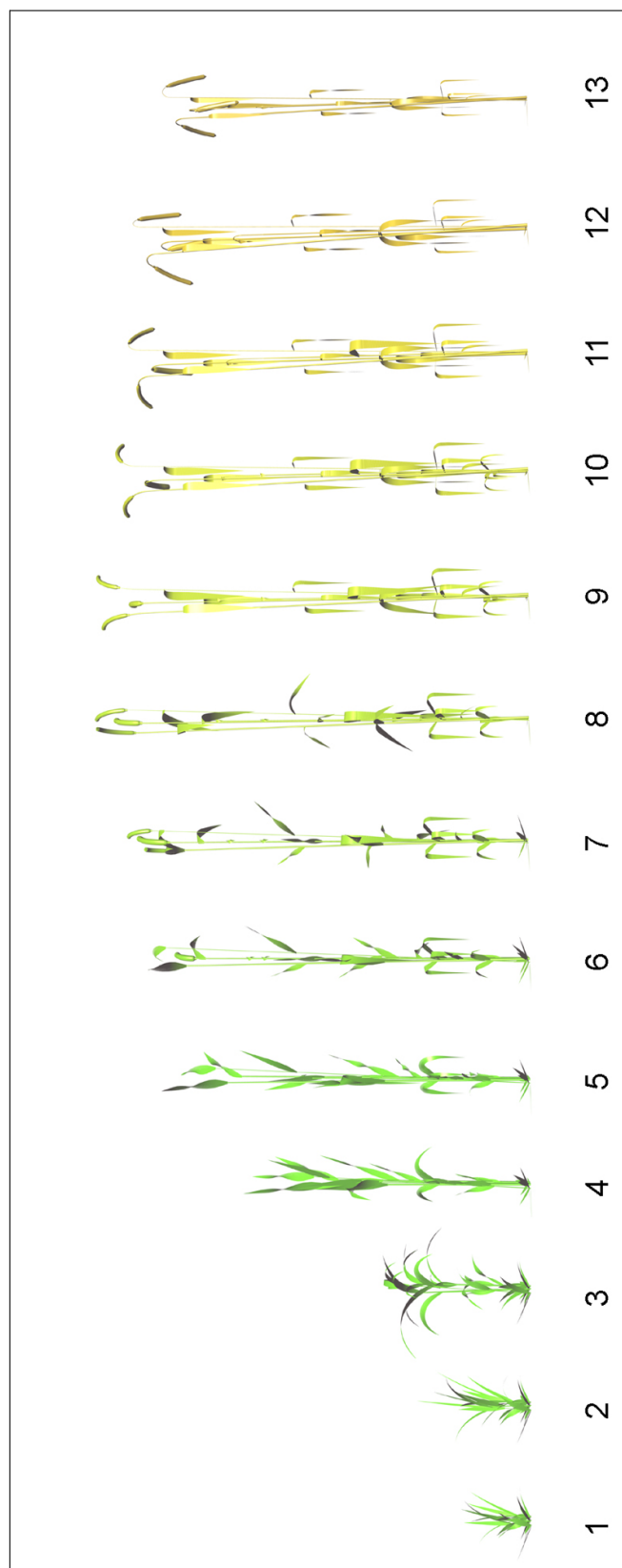


Abb. 4.5 – Die 3D-Darstellung der Pflanzen in den 13 Wachstumsstadien mit jeweils 3 voll entwickelten Stängeln für Winterweizen (Spengler, voraussichtlich 2011).

4.1.1.3 Virtuelles Bodenmodell

Die digitalisierten Höhenprofile der Feldreihen bilden die Grundlage zur Erzeugung der digitalen Geländemodelle (DGMs). Durch Angabe von Feldgröße und Reihenabstand wird die benötigte Anzahl der Höhenprofile berechnet und mittels eines Zufallsgenerators aus der Datenbank ausgewählt. Anschließend werden diese zu einem DGM zusammengesetzt. Durch Angabe der Reihenorientierung wird das DGM entsprechend gedreht und schließlich auf die gewünschte Feldgröße ausgestanzt. Um eine natürlich wirkende Oberflächenstruktur zu erzeugen, wird das DGM mit einem körnigen Muster überlagert. Dafür werden Filter definiert, die jeweils eine nach oben oder nach unten geöffnete Halbkugel beschreiben und mit einem zufällig bestimmten Durchmesser (entsprechend der Korngröße) eines vorher definierten Wertebereichs zufällig im DGM platziert werden. Für das Bodenmodell können drei verschiedene Reihenabstände gewählt werden: enger (8 - 12 cm), mittlerer (13 - 17 cm) und weiter (22 - 26 cm) Abstand. Der mittlere Reihenabstand wird bei den drei untersuchten Getreidearten am häufigsten verwendet. Der weite Reihenabstand wird vor allem in der ökologischen Landwirtschaft verwendet, dessen Verbreitung flächenmäßig stetig zunimmt (BMELV, 2010). Der enge Reihenabstand ist sehr selten und wurde hier nur für Vergleichszwecke modelliert. Abb. 4.6 zeigt ein modelliertes Boden DGM.

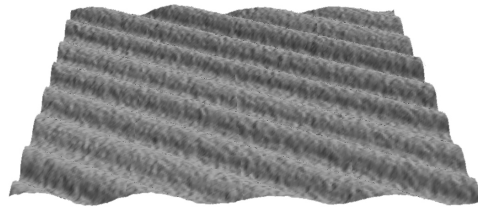


Abb. 4.6 – Boden-DGM mit charakteristischen Reihen und körniger Oberfläche. Das DGM deckt eine Fläche von 2 m x 2 m ab und hat eine relative Reihenorientierung zur Beleuchtung von 60°. Die Korngröße variiert zwischen 1 mm und 15 mm.

4.1.1.4 Virtuelles Bestandsmodell

Die Komposition aus Boden-DGM und verschiedenen 3D-Pflanzendarstellungen ergibt das 3D-Bestandsmodell. Dafür müssen die mit AMAPsim erzeugten 3D-Pflanzen in das Eingabeformat des Raytracers umgewandelt werden. Dabei werden jeweils alle Flächen eines Pflanzenorgans (z.B. ein Blatt oder ein Stängelabschnitt) zu einer Gruppe zusammengefasst. Jeder dieser Gruppen wird anschließend ein Material zugeordnet, welches aus der am Anfang des Abschnitts beschriebenen spektralen Datenbank ausgewählt wird. Für jedes Pflanzenorgan sind in jedem Wachstumsstadium mehrere Spektren vorrätig. Eine Art Zufallsgenerator wählt jeweils eins davon aus, so dass eine spektrale Variation innerhalb des Bestandes gewährleistet ist. Ein Vorteil des verwendeten Raytracers Drat ist die Möglichkeit, die 3D-Modelle nicht nur mit Dreiecken zu beschreiben, sondern auch mit Hilfe von Kreisen und Zylindern. Somit können alle zylindrischen Pflanzenorgane (Stängel, Ähre und Grannen) kompakter beschrieben werden. Das oben erwähnte 3D-Roggenmodell im Wachstumsstadium 11 besteht nach der Umwandlung aus nur noch ca. 6000 Einzelobjekten (davon sind ca. 3800 Zylinder pro Pflanzenmodell); das vor allem die Rechenzeit verkürzt.

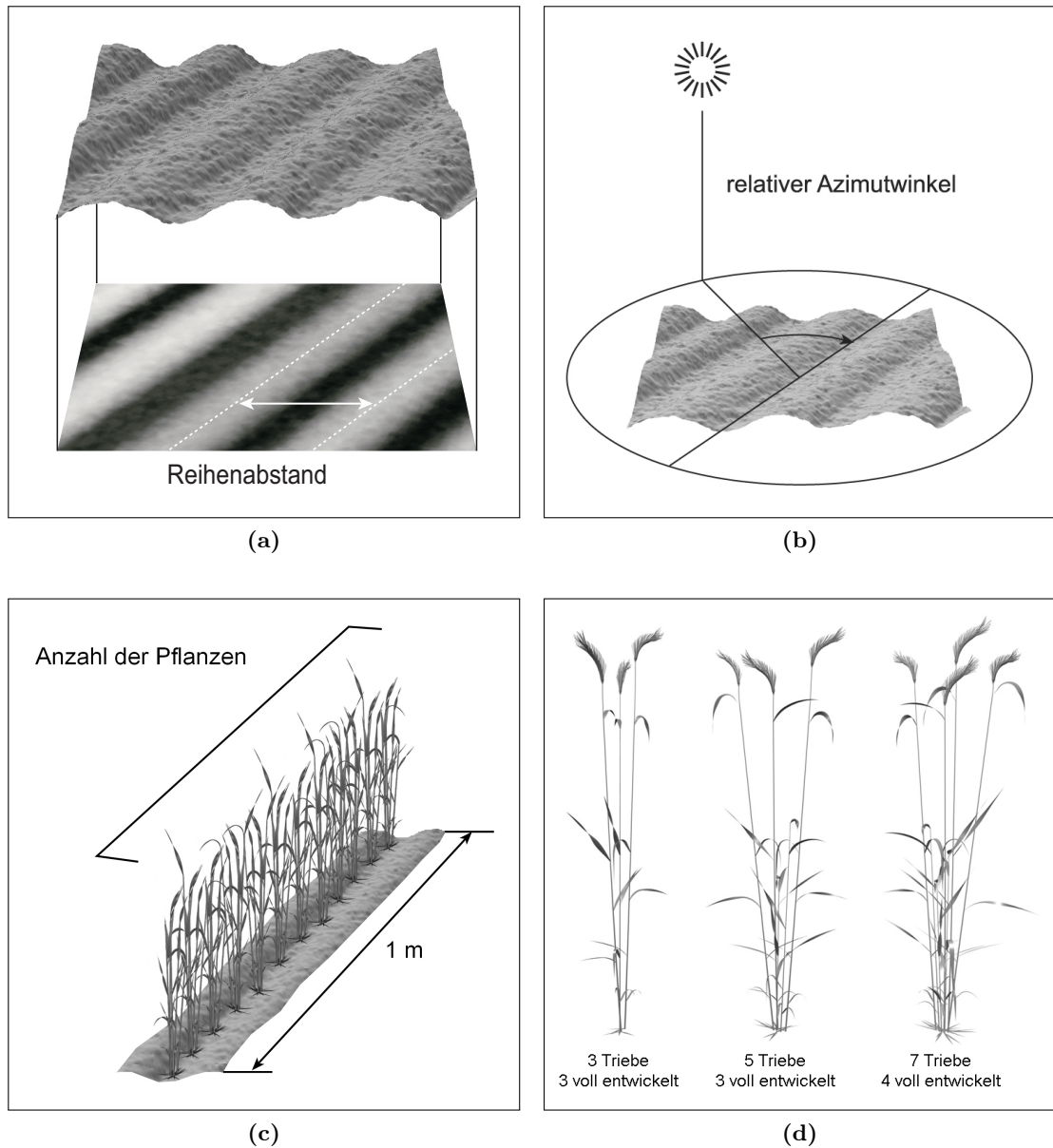


Abb. 4.7 – Die einzelnen Parameter zur Charakterisierung eines virtuellen Bestandsmodells: (a) Reihenabstand (RA), (b) relative Orientierung der Reihen zum Beleuchtungsazimut (RRO), (c) Anzahl der Pflanzen pro Meter in einer Reihe (PPM), (d) Anzahl der Triebe pro Pflanze mit Anzahl der voll entwickelten Triebe (TPP).

Bei der Platzierung der Pflanzen auf dem Boden-DGM müssen die Reihenorientierung sowie der Pflanzabstand beachtet werden. Beides sind Faktoren, die die typische Reihenstruktur und die Dichte des Bestandes bestimmen. Als erstes werden die Pflanzen unter Angabe der Anzahl pro Reihe und Meter entlang der tiefsten Stelle der Reihe platziert. Als zweites werden die Pflanzen entlang der Reihen und quer dazu zufällig jeweils ein Stück versetzt, wobei die Abstände mittels einer Gaußverteilung mit vorher definierter Standardabweichung bestimmt werden, um einen möglichst realistischen Bestand zu erzeugen. Ein komplettes virtuelles 3D-Bestandsmodell besteht dabei jedoch nur aus einigen wenigen Pflanzen, den Pflanzenprototypen, die innerhalb der Szene virtuell „geklont“ werden. Die Pflanzen unterscheiden sich dabei ein wenig in der physiologischen Entwicklung und der Morphologie (Anzahl der Triebe pro Pflanze, Pflanze mit unterentwickelten Trieb/en; siehe dazu auch Spengler (voraussichtlich 2011)), so dass sie in ihrer Gesamtheit ein bestimmtes Wachstumsstadium des Bestandes repräsentieren. Jeder „Klon“ wird zufällig aus der Liste der möglichen Pflanzen des Bestandes gewählt und um einen zufälligen Winkel um seine Vertikalachse gedreht, um störende Muster zu verhindern.

Jedes erzeugte virtuelle Bestandsmodell kann durch folgende Parameter charakterisiert werden: Reihenabstand (RA), relative Orientierung der Reihen zum Beleuchtungsazimut (RRO), Anzahl der Pflanzen pro Meter in einer Reihe (PPM), Anzahl der Triebe pro Pflanze mit Anzahl der voll entwickelten Triebe (TPP). In Abb. 4.7 sind die einzelnen Parameter visualisiert.

Aus dem 3D-Modell kann auch der LAI und der Bedeckungsgrad (engl. *percentage cover*, PC) abgeleitet werden. Für den LAI wird die einseitige Oberfläche aller Einzelflächen, die die Blätter bilden, bei jedem im Feld vorkommenden Pflanzenprototyp bestimmt, aufsummiert und mit der Anzahl der Klone multipliziert. Anschließend wird die Gesamtsumme der Blattoberflächen mit der horizontalen Fläche des Bestandes normiert (LAI Definition nach Monteith (1973)). Auf diese Weise lässt sich der reale LAI jedes virtuellen Bestandes bestimmen. Als zusätzliche Option lässt sich die Ähre in die Berechnung mit einbeziehen. Dafür wird die durch die ersten beiden Hauptachsen der Ähre aufgespannte Fläche bestimmt. Für den PC wird der Bestand orthogonal in der Grundrissebene abgebildet und in eine Matrix umgewandelt. Anschließend wird die Anzahl der Vegetationspixel bestimmt und mit der Gesamtpixelzahl der Matrix normiert.

4.1.2 Simulation der Bestandsreflexion

Für die Reflexionssimulation wird der aDvanced Radiometric rAy Tracer (Drat) verwendet. Es handelt sich dabei um einen rückwärtsgerichteten Monte-Carlo-Raytracingalgorithmus (vgl. Abschn. 3.3.3), der von P. Lewis (Lewis und Muller, 1992; Lewis, 1996, 1999) speziell für die Erforschung der stark streuenden Vegetationsbestände entwickelt wurde. Die Reflexionsergebnisse werden dabei als Funktion der Streuungsordnung (engl. *scattering order*) gespeichert und ermöglichen somit die Analyse der Mehrfachstreuung. Drat wurde schon in vielen Studien verwendet (z.B. Lewis und Disney, 1998; Disney et al., 1998; Saich et al., 2002, 2003; Lewis et al., 2003; Disney et al., 2003 und Disney et al., 2006). Dabei wurde gezeigt, dass die Simulationsergebnisse sowohl mit Feldmessungen als auch mit anderen Modellen zur Simulation von Vegetationsbestandsreflexion übereinstimmen.

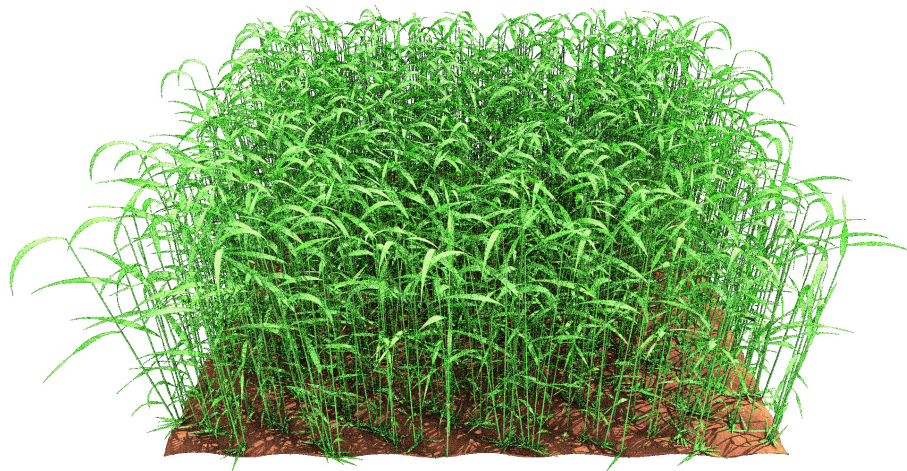


Abb. 4.8 – Modellierter Winterroggenbestand im Wachstumsstadium 5. Abbildung generiert mit Drat (Lewis, 1999).

Die Simulation der Reflexion eines Vegetationsbestandes erfolgt durch vorherige Definition eines detaillierten 3D-Vegetationsbestandes, eines Kameramodells, eines Lichtmodells sowie der zu simulierenden Bänder (Angabe durch Zentrumswellenlänge) und der Anzahl der zu verfolgenden Interaktionen pro Strahl (Mehrfachstreuung). Es können verschiedene Kameramodelle (z.B. orthographische Kamera, zentralperspektivische Kamera oder hemisphärische Kamera) verwendet werden. Die orthographische und die zentralperspektivische Kamera sind dabei die gängigsten Modelle. Die Definition des speziellen Kameramodells wird durch folgende Parameter festgelegt:

- Der Zielpunkt, der im Ursprung liegt,
- die Kameraposition, die durch Azimut- und Zenitwinkel sowie den Abstand zum Zielpunkt definiert ist,
- die zu beobachtende Fläche, die durch einen Öffnungswinkel oder als horizontale Fläche um den Blickpunkt bestimmt wird,
- der Anzahl der losgeschickten Strahlen pro Pixel,
- die Anzahl der Pixel in x- und y-Richtung, die die Größe der Fläche und somit die räumliche Auflösung der gesamten Simulation bestimmen

Zur Beleuchtung der Szene wird eine punktdirektionale Quelle verwendet, deren Position und Einstrahlrichtung durch Azimut- und Zenitwinkel definiert wird. Die Ergebnisse der Raytracing-Simulation sind ein Reflexionsspektrum und eine Abbildung. Die Abbildung zeigt die beobachtete Fläche für alle simulierten Bänder. Die Werte des Reflexionsspektrums pro Band sind nach den einzelnen Streuungsordnungen (soviele wie Interaktionen pro Strahl definiert wurden) sortiert. Die Summe der Reflexionswerte aller Streuungsordnungen eines Bandes ergeben den Reflexionsfaktor des Bandes.

Die Rechenzeit einer Simulation hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Die Anzahl der Einzelobjekte pro abzutastende Szene (abhängig von der Anzahl der Einzelobjekte eines Pflanzenprototyps und der Anzahl der Pflanzen pro Szene und damit auch abhängig von der Größe der zu beobachtenden Szene),
- Die Anzahl der zu simulierenden spektralen Bänder,
- Die Anzahl der losgeschickten Strahlen pro Pixel,
- Die Auflösung der Bildszene (Anzahl der abzutastenden Pixel der Bildebene).

Je größer diese Anzahlen sind um so länger dauert eine Berechnung. Die Simulation einer durchschnittlichen Winterroggenszene (mittlerer Reihenabstand und 13 PPM) im Wachstumsstadium 4 dauert z.B bei einer abzutastenden Szenengröße von 1x1 m mit 4 Strahlen pro Pixel, einer Bildebene von 250x250 Pixeln und 913 Bändern mit einem Prozessor des aktuellen Stands (ca. 3 GHz) ca. 95 Minuten. Die gleiche Szene mit nur 75 spektralen Bändern nur ca. 30 Minuten. Eine Winterroggenszene unter gleichen Bedingungen jedoch im Wachstumsstadium 6 benötigt für nur 75 Bänder schon über 120 Minuten für eine Simulation unter einer bestimmten Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie. Der Grund für diese sehr hohe Rechenzeit liegt an der Gestalt der Pflanzen. Im Wachstumsstadium 4 sind noch keine Ähren entwickelt, aber im Wachstumsstadium 6 haben bereits alle Triebe voll entwickelte Ähren inklusive Grannen. Jede Ähre besteht aus 30 Zylinder und an jedem Zylinder sind jeweils 4 Grannen, die wiederum aus 10 kleinen Zylindern zusammengesetzt sind (insgesamt 1200 Einzelobjekte pro Ähre). Eine Winterweizenszene im Wachstumsstadium 6 benötigt hingegen nur ca. 60 Minuten für eine Simulation, da die Modelle des Winterweizens keine Grannen enthalten.

4.1.3 Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung wurden für alle drei Getreidearten zahlreiche unterschiedliche Bestände in allen 13 Wachstumsstadien modelliert (39 zu untersuchende Fälle) und in Nadirrichtung mit maximal 50 Strahlungsinteraktionen abgetastet. Die Bestände variieren dabei in der Pflanzendichte, der relativen Orientierung der Reihen zum Azimutwinkel der Beleuchtung und in der Zusammensetzung der Pflanzen. Die Pflanzendichte wird sowohl über die Anzahl der Pflanzen pro Meter und Reihe als auch über die Anzahl der Triebe pro Pflanze definiert. Hierfür wurden Werte zwischen 8 und 16 PPM und 4 bis 6 TPP gewählt, wobei jeweils nur 2 (bei 4 und 5 TPP) bzw. 3 (bei 5 und 6 TPP) Triebe voll entwickelt modelliert wurden. Für die relative Orientierung der Reihen zum Beleuchtungsazimut (RRO) wurden jeweils 0°, 30°, 60°, 90°, 120° und 150° gewählt. Beim Reihenabstand wurden mittlere Werte zwischen 13 cm und 17 cm verwendet, da diese Werte denen im Testgebiet entsprechen. Die Vielzahl an Variationen zwischen den einzelnen Beständen eines Falles soll dabei die mögliche Variation der natürlichen Felder wiedergeben.

Die Bestände wurden in zwei Schritten validiert. Als erstes wurden die simulierten Reflexionsspektren mit den im Feld gemessenen verglichen, wobei auf die Form und die Gesamtalbedo der Signale geachtet wurde. Im zweiten Schritt wurden Vegetationsbedeckung und LAI der Bestände mit den vorher ermittelten ähnlichsten Spektren bestimmt und mit den Felddaten verglichen.

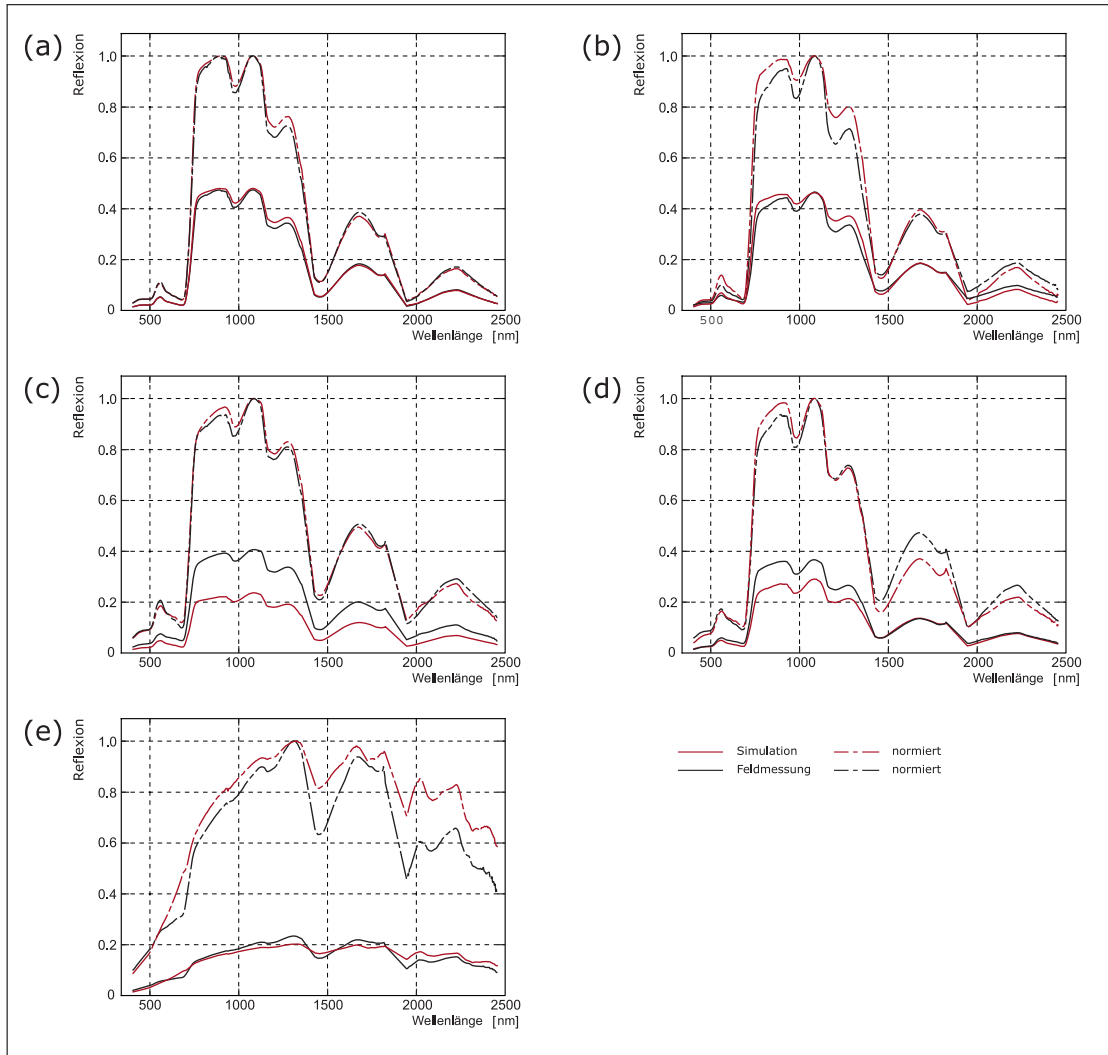


Abb. 4.9 – Beispiele für die Kategorien der Übereinstimmungen. (a) sehr gute Übereinstimmungen bei der Form und der Albedo (WR04); (b) gute Übereinstimmungen bei der Form und der Albedo (WB03); (c) sehr gute Übereinstimmungen bei der Form aber nicht bei der Albedo (WR07); (d) gute Übereinstimmungen bei der Form aber nicht bei der Albedo (WB06); (e) mäßige Übereinstimmungen bei der Form und gute bei der Albedo (WW13).

4.1.3.1 Reflexionsspektren

Für den Vergleich der Reflexionsspektren wurden jeweils die ähnlichsten Feld- und Modellspektren bestimmt. Wie bei der Bestimmung des passenden Transmissionsspektrums in Abschn. 4.1.1 wurde eine Kostenfunktion zwischen modelliertem und im Feld gemessenem Bestandsspektrum aufgestellt (vgl. Gl. 4.1) und minimiert. Der Vergleich wurde dabei jeweils pro Wachstumsstadium zwischen allen Feld- und Modellspektren durchgeführt. Zusätzlich wurde ein zweiter Vergleich durchgeführt, bei dem zunächst alle Feld- und Modellspektren normiert (Division aller Bänder durch den höchsten Wert) wurden, um die Albedounterschiede zu entfernen, so dass nur die Form des Spektrums zur Entscheidung beiträgt, im Gegensatz zum ersten Vergleich, bei dem vor allem die Gesamtalbedo das Ergebnis bestimmt. 17 der 31

getesteten Fälle (für die WS 12 und 13 von Gerste, WS 1, 2, 3, 6, 8 und 12 von Weizen sind keine geeigneten Feldmessungen vorhanden) ergaben gute und sehr gute Übereinstimmungen bei beiden Durchläufen, also bei der Form und der Gesamtalbedo. 12 weitere Fälle ergaben gute und sehr gute Übereinstimmungen bei der Form der Spektren, jedoch mit unterschiedlicher Gesamtalbedo. Nur 2 Fälle ergaben eher mäßige Übereinstimmungen bei der Form, aber gute bei der Gesamtalbedo. In Tab. 4.1 sind die Ergebnisse der einzelnen Fälle zusammengefasst und Abb. 4.9 zeigt Beispiele für die einzelnen Kategorien der Übereinstimmungen.

Tab. 4.1 – Ergebnisse des Vergleichs zwischen modellierten Bestandsreflexionen und im Feld gemessenen: ++ sehr gute Übereinstimmungen bei der Form und der Albedo; + gute Übereinstimmungen bei der Form und der Albedo; ** sehr gute Übereinstimmungen bei Form aber nicht bei der Albedo; * gute Übereinstimmungen bei der Form aber nicht bei der Albedo; – mäßige Übereinstimmungen bei der Form und gute bei der Albedo.

Wachstumsstadium (WS)	Wintergerste (WB)	Winterroggen (WR)	Winterweizen (WW)
01	++	+	keine Validationsdaten
02	*	*	keine Validationsdaten
03	+	–	keine Validationsdaten
04	++	++	++
05	++	+	++
06	*	**	keine Validationsdaten
07	*	**	++
08	*	**	keine Validationsdaten
09	*	++	++
10	+	+	*
11	*	+	+
12	keine Validationsdaten	*	keine Validationsdaten
13	keine Validationsdaten	+	–

Die weniger guten Übereinstimmungen können durch eine Vielzahl von Faktoren bedingt sein. Zum Beispiel führen unterschiedliche Bodenfeuchtegehalte zur Variation der Albedo. Die simulierten Spektren sind alle mit den optischen Eigenschaften desselben Bodengrundes mit einem durchschnittlichen Bodenfeuchtwert von 4 % bestimmt worden. Bei einem trockenerem Boden würde ein Bestandsspektrum mit einer allgemein höheren Albedo bestimmt werden. Weiterhin bestimmen die spektralen Eingabedaten das resultierende Bestandsspektrum enorm. Allgemein zu niedrige Blattreflexionen führen deshalb zu allgemein zu niedrigen Bestandsreflexionen, wie sie in 12 der 31 Fälle vorkommen. Diese zu niedrigen Blattreflexionen sind vor allem messbedingt, denn auch die Blattoberflächen reflektieren winkelabhängig, was sich im Feld nur eingeschränkt berücksichtigen lässt. Bei den älteren Wachstumsstadien bewirkt im Feld auftretende vitale Begleitvegetation ein vitaleres Reflexionsspektrum (vgl. Abb. 4.9(e)) als bei der Simulation, da diese Begleitvegetation nicht mit modelliert wurde. Außerdem führen Messfehler im Feld, z.B. bei nicht exakt in Nadirrichtung gehaltener Messpistole, zu verfälschten Messergebnissen.

4.1.3.2 Bedeckungsgrad

Die im Feld aufgenommenen Fotos sind jeweils mit einem 0,5 m x 0,5 m Rahmen aufgenommen worden. Somit ist sichergestellt, dass jeweils die gleiche Fläche betrachtet wird. Die Fotos werden mit einer einfachen Methode in Vegetation und Bodengrund klassifiziert. Hierbei wird zunächst die grüne, vitale Vegetation vom Rest des Bildes getrennt, wenn der Wert im grü-

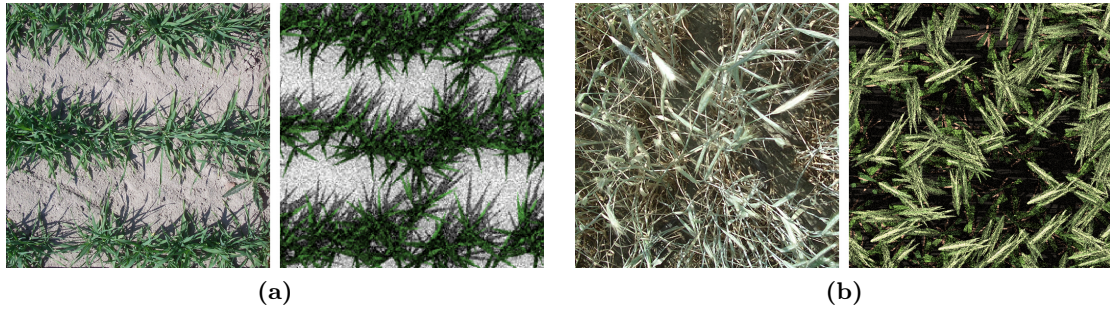


Abb. 4.10 – Vergleich der Bestände zwischen zwei realen und modellierten Beständen. (a) WR02 und (b) WR09, das linke Bild zeigt jeweils die im Feld aufgenommenen Fotos und das rechte Bild die Ausgabe von Drat der modellierten Bestände.

nen Kanal größer als im roten ist. Da der Boden meist recht dunkel gegenüber der trockenen Vegetation ist, ist die Trennung dieser beiden Anteile mittels der Gesamtalbedo möglich. Sehr helle Bodenflächen ließen sich jedoch nur schwer oder gar nicht von trockener Vegetation trennen (vgl. Abb. 4.10(b)). Da besonnter Boden in den älteren Stadien verhältnismäßig selten vorkam, hielt sich dieser Fehler in Grenzen. Weiterhin führt die Zentralperspektive der Fotos zu einer Überschätzung der Vegetation. Durch eine Abschätzung in Abhängigkeit von der Bestandshöhe wurde für jedes Wachstumsstadium ein Korrekturwert festgelegt (ab 0,2 m -1 %, ab 0,4 m -2 %, ab 0,7 m -3 %, ab 1,1 m Bestandshöhe -4 %). Abb. 4.10 zeigt den Vergleich zwischen den im Feld aufgenommenen Fotos und den von Drat ausgegebenen Bildern von Roggen in zwei verschiedenen Wachstumsstadien. Der Unterschied der Perspektive zwischen Foto und Simulation ist bei WR09 deutlich zu sehen. Die Ergebnisse der Analyse zum Bedeckungsgrad sind in Abb. 4.11 für alle drei Getreidearten in den verschiedenen Wachstumsstadien der ähnlichsten Reflexionsspektren dargestellt.

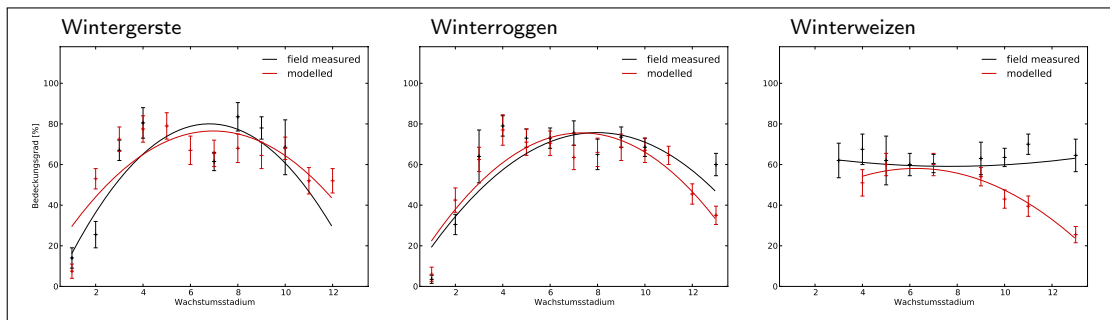


Abb. 4.11 – Vergleich des Bedeckungsgrades für die verschiedenen Wachstumsstadien zwischen in situ gemessenen und modellierten Beständen. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte und deren einfache Standardabweichung. Die Kurve stellt die Trendkurve (Polynom 2. Grades) der Mittelwerte dar.

Bei Gerste und Roggen passen die Werte teils sehr gut zusammen. Auch die Trendkurven der Mittelwerte von in situ Messungen und modellierten Daten stimmen sehr gut überein. Bei Weizen liegen die in situ gemessenen Werte teils sehr deutlich über den Werten der modellierten Bestände. Die Trendkurve der Modellbestände bildet ähnlich wie bei Gerste und Roggen eine nach unten geöffnete Parabel mit dem Maximum vor Beginn der Samenrei-

fe, währen die Trendkurve der in-situ-Messungen eher einer Geraden gleicht. Die Werte der in-situ-Messungen von Weizen scheinen demnach untypisch. Ein Grund dafür ist die vitale Begleitvegetation, welche vor allem in den älteren Stadien (siehe auch WR13) einen hohen Bedeckungsgrad bewirkt. Weiterhin sind für Weizen relativ wenig Daten aufgenommen worden, da dieser nur in einer Vegetationsperiode beobachtet werden konnte. Die erhobenen Daten scheinen nicht ausgereicht zu haben, um eine repräsentative Menge abzubilden.

4.1.3.3 Blattflächenindex

Im Gegensatz zu den vorherigen Analysen ist die Überprüfung des LAIs wegen fehlender Vergleichsmessungen nur eingeschränkt möglich. Um aber dennoch eine Aussage zu den LAI-Werten der modellierten Bestände treffen zu können, wurde nach LAI-Daten während der phänologischen Entwicklung in der Literatur recherchiert. Abb. 4.12 zeigt die LAI-Werte der

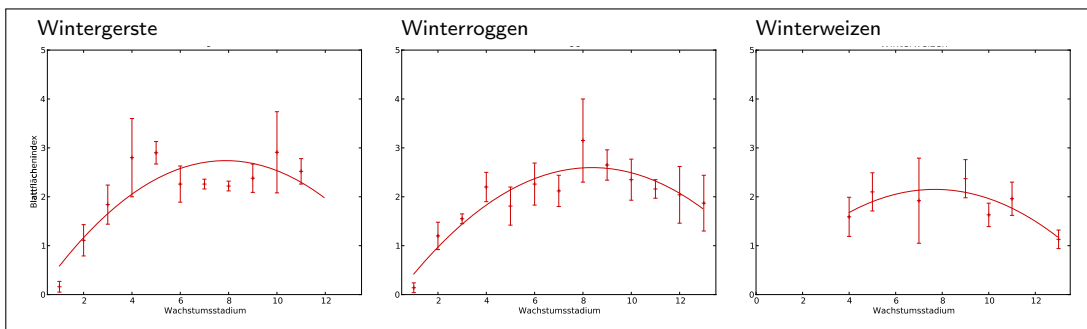


Abb. 4.12 – LAI-Werte für die verschiedenen Wachstumsstadien der modellierten Bestände. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte und deren einfache Standardabweichung. Die Kurve stellt die Trendkurve (Polynom 2. Grades) der Mittelwerte dar.

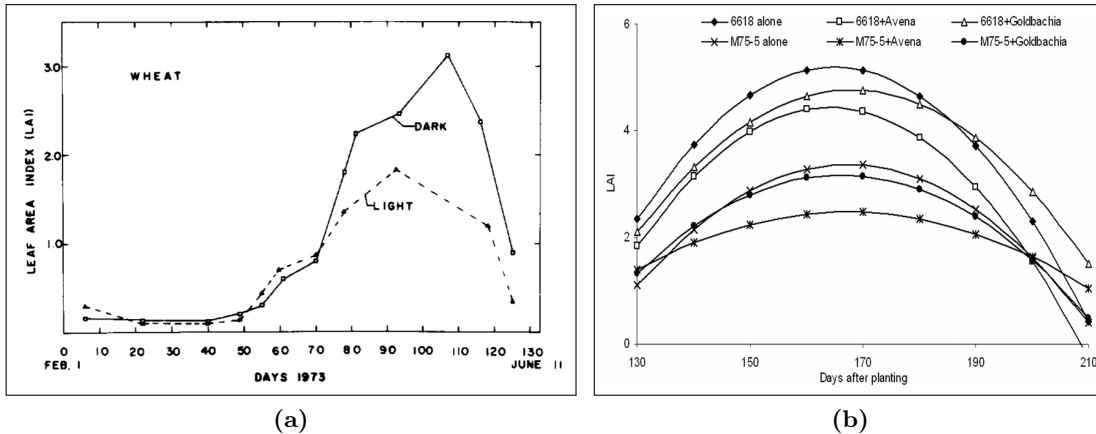


Abb. 4.13 – Saisonale typische Trendkurven des LAI von Weizenbestnden: (a) Sommerweizen auf Schlufflehm (light) und auf schluffigem Tonlehm (dark) in Kansas (USA) von Kanemasu (1974); (b) Winterweizen im Iran ohne (, x) und mit unerwünschter Begleitvegetation (, , *, ) von Baghestani et al. (2006).

modellierten Bestände für alle drei Getreidearten in den verschiedenen Wachstumsstadien der jeweils ähnlichsten Reflexionsspektren. Dabei zeigen die Werte aller drei Getreidearten die typische, saisonal bedingte Trendkurve, mit dem Maximum vor Beginn der Samenreife, wie sie häufig beschrieben wird (z.B. in Kanemasu, 1974; Zhang et al., 2004 und Baghestani et al., 2006). Abb. 4.13 zeigt zum Vergleich saisonale Trendkurven von Sommerweizen in Kanemasu (1974) und von Winterweizen in Baghestani et al. (2006), welche gut mit den simulierten Daten übereinstimmen.

4.1.3.4 Fazit

Die Validierung in zwei Schritten hat gezeigt, dass die modellierten Bestände den Feldbeständen strukturell gut nachempfunden sind. Außerdem wurde gezeigt, dass die Reflexionssimulation vergleichbare Ergebnisse liefert, wie die Messung im Feld.

4.2 End-to-End Sensorsimulation

Eine End-to-End-Sensorsimulation besteht aus zwei Teilen, einer Vorwärts- und einer Rückwärtssimulation. Der erste Schritt entspricht der Sensorsimulation, bei der räumlich und spektral die hoch aufgelösten Reflexionsdaten in das sensorspezifische Produkt (DN-Daten) umgewandelt werden. Der zweite Teil entspricht der typischen Vorprozessierung von Fernerkundungsdaten, bei der mittels eines L1-Prozessors (Umwandlung in Strahldichtewerte) und eines L2-Prozessors (Atmosphärenkorrektur) die sensorspezifischen DN-Daten in Reflexionswerte umgerechnet werden.

In dieser Arbeit wurden die Getreidebestandsreflexionen jeweils in EnMAP-ähnliche und Sentinel-2-ähnliche Reflexionsdaten umgewandelt. Im Folgenden werden die Prozessierungswege für beide Simulationen vorgestellt.

4.2.1 EnMAP-Simulation

Die Vorwärtssimulation erfolgt in drei Teilschritten:

- Umwandlung der BOA-Reflexionswerte in TOA-Spektraldichtewerte mittels gefalteter Atmosphärenparameter;
- Spektrale Abtastung mittels gegebener spektraler Kenngrößen;
- Radiometrische Simulation.

Die räumliche Abtastung wird bei dieser Simulation nicht berücksichtigt, da die BOA-Reflexionswerte bereits die räumliche Komponente beinhalten. Die TOA-Strahldichten sind mit Hilfe einer Atmosphärensimulation bestimmt worden. Hierfür wurde die von Guanter et al. (2009) entwickelte, auf MODTRAN4 basierende Methode verwendet. Unter Angabe der atmosphärischen Parameter, der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie sowie der Gelände- und Sensorhöhe werden die für die Lösung von Gl. 2.6 benötigten Parameter bestimmt. Die atmosphärischen Parameter sind die optische Dicke der Aerosole (engl. *aerosol optical thickness*, AOT) und der Wasserdampfgehalt (engl. *columnar water vapour*, CWV). CWV ist lokal sehr variabel, bedingt durch Wettereinflüsse und das Relief. Für die Simulation wurden Standardwerte eines klaren Frühlings- bzw. Sommertages während der Mittagszeit in Brandenburg

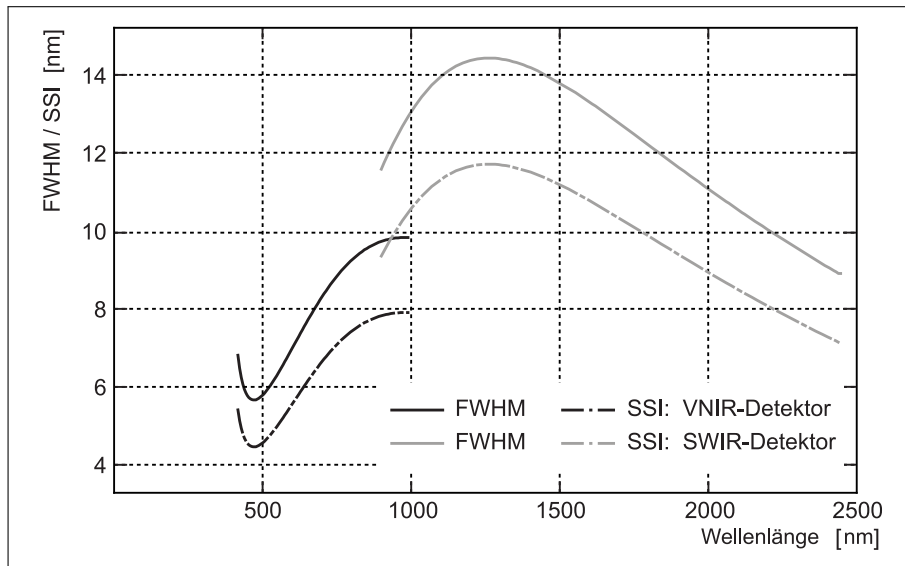


Abb. 4.14 – FWHM und SSI der beiden EnMAP-Detektoren. Technischer Stand März 2009.

(ca. N 52.5° E 13°) gewählt ($AOT = 0.2$ bei 550 nm und $CWV = 2.0 \text{ g/cm}^2$) (AERONET, 2010). Die Flughöhe von EnMAP beträgt 643 km. Für das Gelände wird eine durchschnittliche Höhe von 50 m über NN angenommen.

Die spektrale Abtastung erfolgt mit den zur Zeit der Simulation aktuellen spektralen Kenngrößen von EnMAP (Stand März 2009). EnMAP ist ein *Pushbroomsystem* mit einem VNIR- und einem SWIR-Flächendetektor. Die 89 Bänder des VNIR-Detektors werden ein durchschnittliches SSI von 6,5 nm haben und die 155 Bänder des SWIR-Detektors 10 nm. Das FWHM entspricht dem 1,25-fachen der SSI-Werte. Abb. 4.14 zeigt die FWHM der beiden EnMAP-Detektoren.

Sowohl die Radiometrische Simulation als auch die L1-Prozessierung erfolgen mit EeteS (*EnMAP end-to-end Simulation*) von Segl (2010). Die vom L1-Prozessor berechneten Strahldichten (Level 1 Daten) werden schließlich mittels einer modifizierten *Empirical Line* Methode atmosphärisch korrigiert und in Reflexionswerte umgerechnet. Für die Korrektur wurde eine spektrale Bibliothek mit 11 verschiedenen Reflexionslevels (0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.50, 0.70, 0.90, 0.99 Reflexionsfaktor) als Referenz angelegt. Diese wurde, wie die zuvor behandelten Getreidereflexionsspektren, mit jeweils den gleichen Beobachtungs- und Beleuchtungswinkeln in TOA-Strahldichte mit FWHM und SSI von EnMAP umgewandelt. Schließlich wurde mit Hilfe der Referenzspektren für jedes Band eine Polynomfunktion 2. Grades aufgestellt und auf die simulierten EnMAP-ähnlichen Strahldichtespektren angewendet, um die Strahldichtewerte in Reflexionswerte abzubilden. Abb. 4.15 zeigt die einzelnen Zwischenprodukte der Simulation.

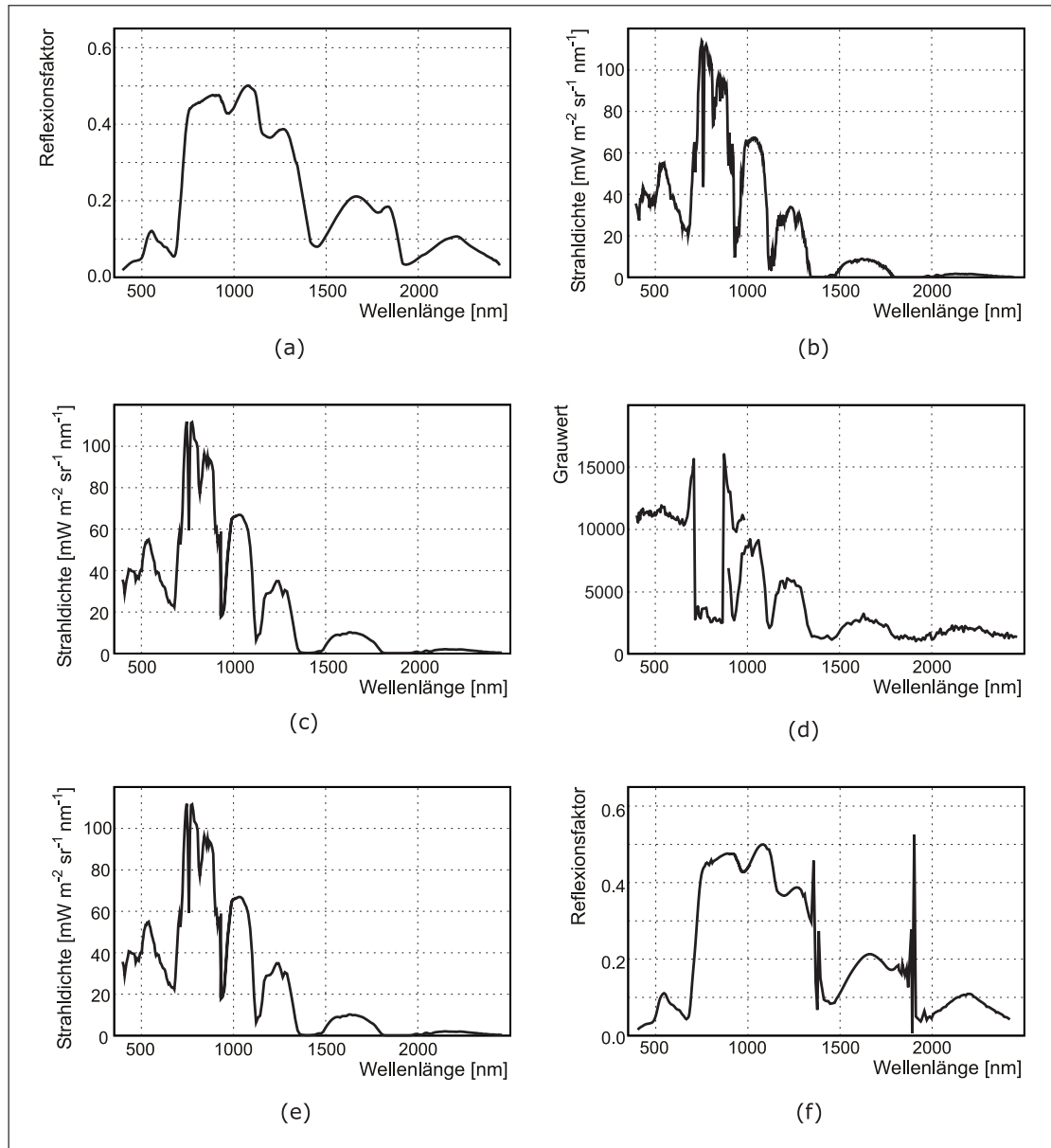


Abb. 4.15 – Zwischenprodukte der spektralen EnMAP-Simulation: (a) BOA-Reflexionsspektrum mit 2 nm FWHM und SSI, (b) TOA-Strahldichtespektrum mit 2 nm FWHM und SSI, (c) TOA-Strahldichtespektrum mit FWHM und SSI von EnMAP, (d) EnMAP-DN-Spektrum mit FWHM und SSI von EnMAP (Level 0 Daten), (e) EnMAP Strahldichtespektrum mit FWHM und SSI von EnMAP (Level 1 Daten) und (f) EnMAP Reflexionsspektrum mit FWHM und SSI von EnMAP (Level 2 Daten).

4.2.2 Sentinel-2-Simulation

Sentinel-2 ist eine von der Europäischen Weltraumorganisation (*European Space Agency*, ESA) speziell für GMES entwickelte multispektrale Satellitenmission. GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) ist eine von der Europäischen Kommission (EU) und der ESA gegründete Initiative zur Schaffung eines nachhaltigen und unabhängigen europäischen Erdbeobachtungssystems. Neben Sentinel-2 sind vier weitere Satellitenmissionen geplant, die mittels Radar und optischer Fernerkundung Informationen für die Beobachtung von Land, Meeren und Atmosphäre liefern sollen. Der Start von Sentinel-2 ist für 2013 vorgesehen. Die Mission, bestehend aus 2 Satelliten, soll an die aktuellen Multispektralmissionen von Landsat und SPOT anknüpfen und kontinuierlich Daten von der Erdoberfläche aufnehmen (GMES, 2010; ESA, 2010).

Die Vorwärtssimulation erfolgt in den gleichen drei Teilschritten wie bei der EnMAP-Simulation. Die Atmosphärensimulation erfolgt ebenfalls wie bei der EnMAP-Simulation allerdings ist die Flughöhe von Sentinel-2 mit 786 km um 143 km höher.

Die spektrale Abtastung erfolgt mit den aktuellen spektralen Kenngrößen (Segl et al., 2006; Drusch et al., 2010). Sentinel-2 wird mit 13 verschiedenen Bändern unterschiedlicher FWHM aufnehmen. Davon liegen 10 Bänder im VNIR- und 3 im SWIR-Bereich. Da die Bänder teils sehr breit sind, wird hier eine breite SRF (vgl. Gl. 2.15) verwendet.

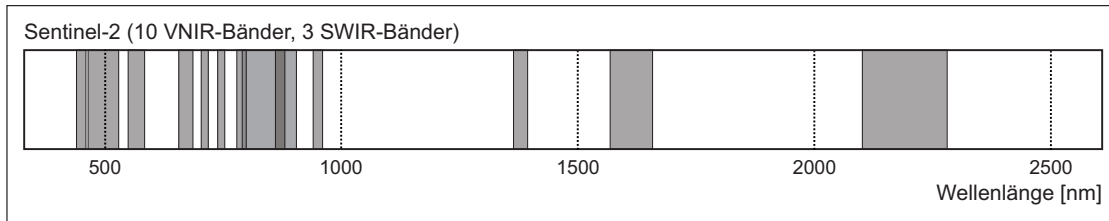


Abb. 4.16 – Spektrale Bänder von Sentinel-2. Die dunkleren Flächen zeigen sich überlappende Bänder.

Die Radiometrische Simulation kann wegen der begrenzten Information nicht so genau durchgeführt werden wie die von EnMAP. Sie erfolgt deshalb in zwei Schritten: (a) Bestimmung und Einbeziehung des Rauschens und (b) Quantisierung der Strahldichtewerte zu DN. Unter der Annahme eines Gauß'schen Rauschens können die SNR-Werte (Segl et al., 2006; Drusch et al., 2010) für die einzelnen Bänder als Standardabweichung des Rauschens betrachtet werden. Für jedes Band sind verschiedene SNR-Werte für verschiedene Strahldichtelevel (L_{min} , L_{ref} und L_{high}) angegeben. Durch Interpolation lässt sich der SNR-Wert für den jeweils gegebenen TOA-Strahldichtewert bestimmen. Anschließend kann mit einem Gauß-verteilten Zufallsgenerator ($\sigma = SNR$, $\mu = 0.0$) ein entsprechender Rauschwert bestimmt werden, der dann auf die TOA-Strahldichte addiert wird. Die Quantisierung wird bandweise mit 12 Bits durchgeführt. Zur Vervollständigung der End-to-End-Sensorsimulation folgt die Atmosphärenkorrektur mittels der im vorherigen Abschnitt beschriebenen modifizierten *Empirical Line* Methode, wobei die Referenzbibliothek hier vorher in Sentinel-2-DN-Daten umgewandelt wurde. Da bei der L1-Prozessierung mittels einer linearen Beziehung DN-Daten in Strahldichtewerte abgebildet werden, ist es möglich, diesen Schritt zu überspringen und die DN-Werte gleich in Reflexionswerte zu überführen.

5 Analyse und Auswertung zum Einfluss der Bestandsstrukturmerkmale auf BRDF und VDF

In diesem Kapitel soll an den in Abschn. 3.1 vorgestellten Stand der Wissenschaft zum Verständnis des Reflexionsvermögens von Vegetationsbeständen angeknüpft werden. Am Beispiel der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten simulierten Reflexionsspektren von virtuellen 3D-Getreidebeständen (Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen) werden verschiedene Einflüsse der Bestandsstruktur auf Reflexionssignale unterschiedlicher Beobachtungsrichtungen sowie auf daraus abgeleitete Vegetationsindizes untersucht.

5.1 Datenbasis

5.1.1 Aufbau einer Datenbank

Für die Analyse wurden 104 verschiedene Bestände pro Getreideart im Wachstumsstadium 4 sowie 36 verschiedene Bestände in Wachstumsstadium 3, 5 und 6 simuliert und von 113 verschiedenen Positionen aus mit dem Raytracer Drat abgetastet. Die Bestände unterscheiden sich dabei in ihren Strukturparametern wie folgt:

- RA: weit, mittel, eng
- RRO: 0° , 30° , 60° , 90°
- PPM: 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
- TPP: 3 verschiedene Pflanzen pro Bestand mit 2, 3 oder 4 Trieben
6 verschiedene Pflanzenprototypen pro Bestand mit 2, 3, 4, 5, 6 oder 7 Trieben
3 verschiedene Pflanzenprototypen pro Bestand mit 3, 4 oder 5 Trieben
4 verschiedene Pflanzenprototypen pro Bestand mit 3, 4, 5 oder 6 Trieben

Für die Untersuchung und den Vergleich der einzelnen Bestände sind aufgrund des hohen Rechenaufwands und des damit verbundenen hohen Zeitaufwands nicht alle möglichen Merkmalskombinationen (336) simuliert worden. Aus diesem Grund erfolgte die Reflexionsimulation der Bestände auch nur für ausgewählte Bänder aus dem roten und dem NIR-Bereich. Bei einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von ca. 100 Prozessoren dauerten die Berechnungen aller Bestände für alle Beobachtungspositionen ca. 20 Tage. Auf die Berechnung des kompletten Wellenlängenbereichs (von 400 – 2450 nm mit einem SSI von 2 nm) wurde verzichtet, da sie hochgerechnet ca. 70 Tage benötigt hätte.

Die Beobachtungspositionen sind nicht nur entlang der Haupt- und der Querebene sondern auch in unregelmäßigen Abständen über die gesamte Hemisphäre für die Zenitwinkel zwischen 0° und 65° verteilt, um möglichen Mustern bei der nachfolgenden Interpolation der

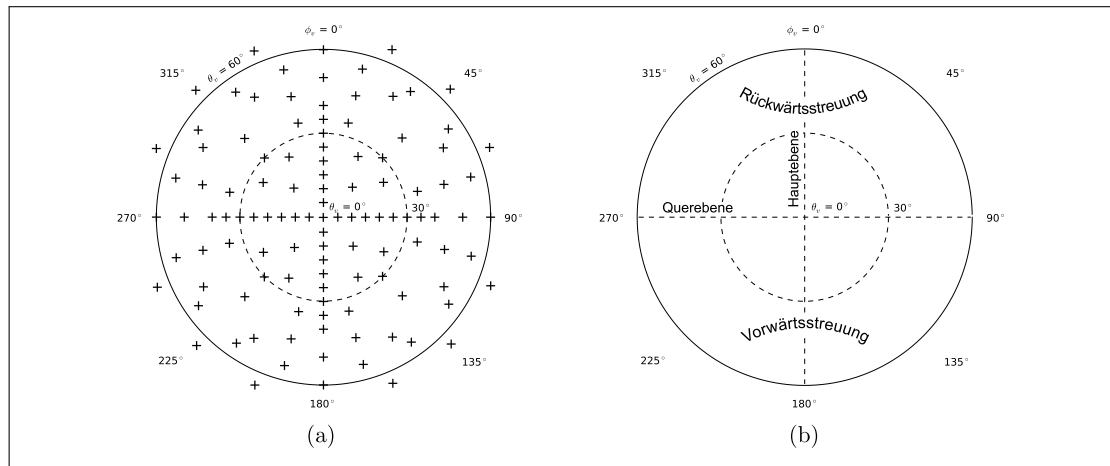


Abb. 5.1 – Beobachtungspositionen: Die Kreuze bei (a) markieren die Positionen auf der Hemisphäre über dem Ziel, von denen das Ziel beobachtet wurde. Der äußere Kreis markiert den Beobachtungszenitwinkel von 60° und der innere Kreis den von 30° . (b) zeigt die Lage von Haupt- und Querebene der BRDF sowie den Bereich der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung.

Daten entgegen zu wirken. Abb. 5.1 zeigt die Verteilung der verwendeten Beobachtungspositionen. Als Beleuchtungsposition wurde ein Sonnenzenitwinkel von 40° verwendet, der für Wachstumsstadium 4 (April) während der Mittagszeit (ca. zwischen 12 und 14 Uhr MESZ) in Brandenburg typisch ist.

5.1.2 Simulierte Bestände

Der Aufbau der für die Analyse simulierten Bestände ist bei allen drei Getreidearten identisch, lediglich Pflanzenart, Wachstumsstadium und die zugehörigen spektralen Informationen unterscheiden sich. In den frühen Wachstumsstadien (WS 1 – WS 5) ähneln sich die drei simulierten Getreidearten in der Architektur der Pflanzen sehr, lediglich Breite und Verdrehung der Blätter und das Längenwachstum der Pflanze (zum Vergleich im WS 4: WB ca. 30 cm, WR ca. 30 cm und WW ca. 20 cm hoch, siehe auch Spengler (voraussichtlich 2011)) variieren ein wenig. Die Abb. 5.2 und 5.3 zeigen einen Querschnitt durch die BRDF entlang der Haupt- und Querebene für alle simulierten Bestände der drei Getreidearten im Wachstumsstadium 4. Jede abgebildete Kurve repräsentiert den Querschnitt der BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm eines bestimmten Bestands (siehe auch Anh. B). Die Kurven sind dem Farbverlauf folgend (niedrige Werte sind blau und hohe Werte rot) nach dem LAI der zugehörigen Bestände sortiert. Bei Getreidebeständen eines Wachstumsstadiums kann die Zunahme des LAI mit der Zunahme der Bestandsdichte gedeutet werden. Der LAI enthält jedoch keine Information bezüglich der Bestandsstruktur. Diese muss gesondert untersucht werden. Die unterschiedliche durchschnittliche Albedo bei $\lambda = 670$ nm ist auf den unterschiedlichen Chlorophyllgehalt der Blätter zurückzuführen. Die Blätter des Winterroggens enthalten viel Chlorophyll und bewirken damit niedrigere Reflexionswerte als die beiden anderen Getreidearten, deren Blätter weniger Chlorophyll enthalten. Weiterhin fällt auf, dass die Varianz bei $\lambda = 670$ nm zwischen den verschiedenen Beständen einer Getreideart bei Winterroggen niedriger ist als bei den beiden anderen Getreidearten, während die Varianz

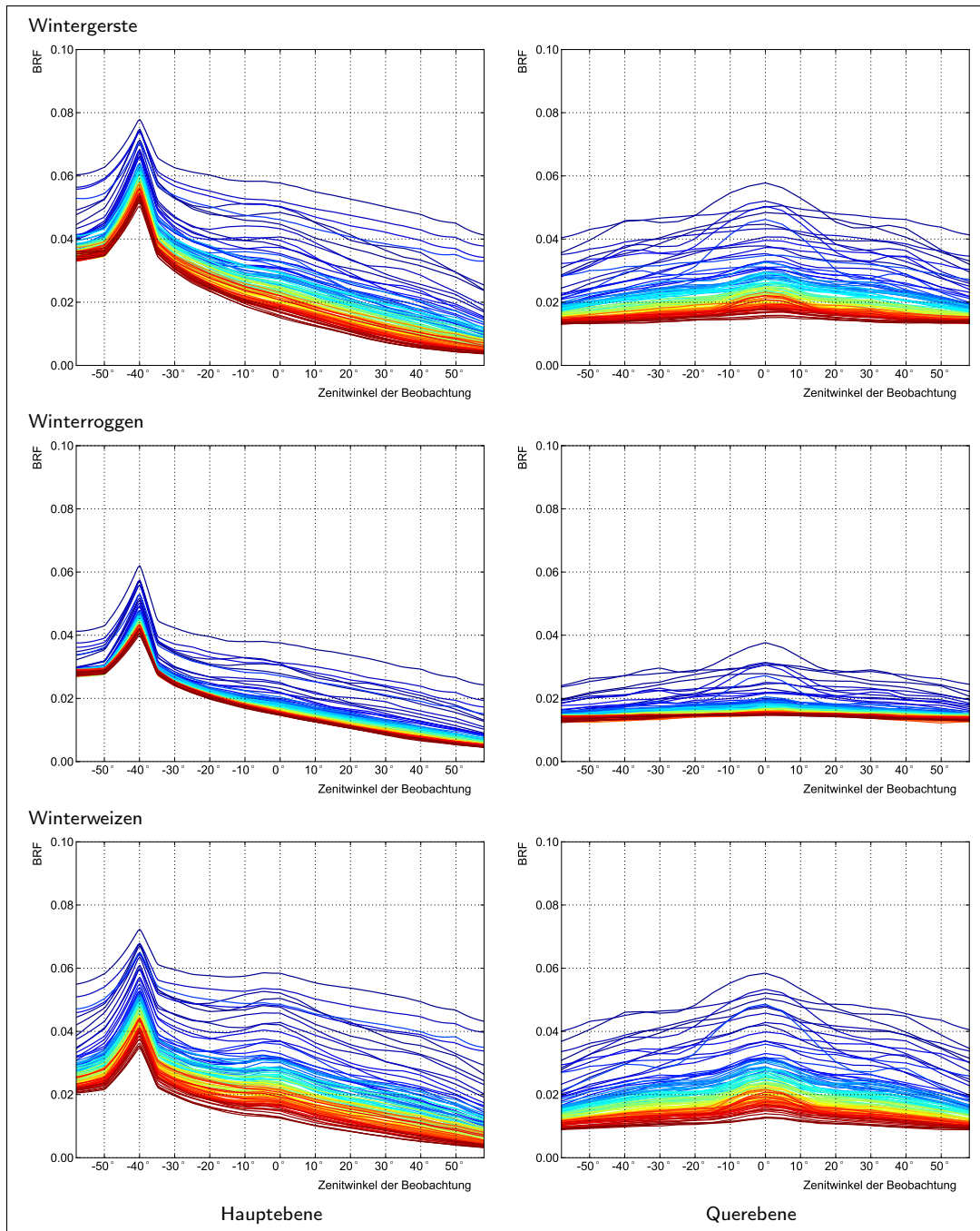


Abb. 5.2 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

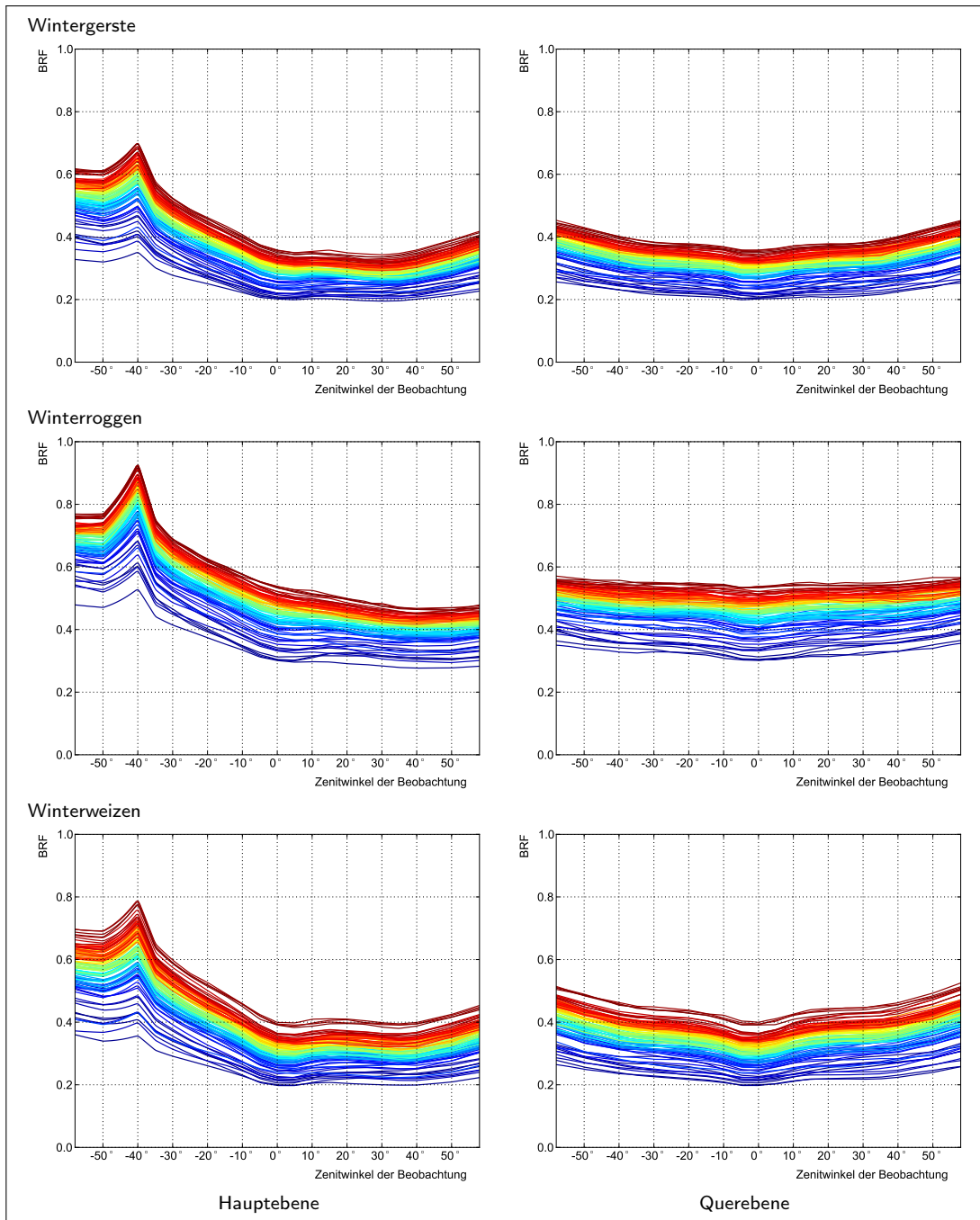


Abb. 5.3 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

bei $\lambda = 800$ nm bei allen drei Getreidearten annähernd gleich ist. Der Grund ist auch hier der unterschiedliche Chlorophyllgehalt, dessen Absorptionswirkung im roten Bereich liegt (vgl. Abschn. 3.1.1). Der hohe Chlorophyllgehalt der Winterroggenblätter unterdrückt schon bei weniger dichten Beständen das Signal des Bodens und bewirkt somit die geringe Varianz in den Daten. Da der Chlorophyllgehalt in den Blättern von Wintergerste und Winterweizen nicht so hoch ist, setzt sich das Signal des Bodens auch bei etwas dichteren Beständen noch durch und bewirkt somit eine größere Varianz in den Daten. Im NIR-Bereich wirkt die Volumenstreuung. Sie ist durch Pflanzen- und Bestandsarchitektur bestimmt (vgl. Abschn. 3.1.2). Die große Ähnlichkeit in der Architektur der Pflanzen aller drei Getreidearten ist der Grund für die annähernd gleiche Varianz bei $\lambda = 800$ nm. Das lokale Maximum bei $\lambda = 670$ nm und das lokale Minimum bei $\lambda = 800$ nm im Nadir bei allen Beständen des Winterweizens zeugt von einer eher erectophilen Blatthaltung. Die Haltung der Blätter bei den beiden anderen Getreidearten hat sich in diesem Stadium schon etwas gesenkt, weshalb die lokalen Extrema nicht bei allen Beständen durchweg festzustellen sind. Die lokalen Extrema bei nur einzelnen Beständen sind Auswirkungen des Reihenabstands und der relativen Reihenorientierung, welches in Abschn. 5.2.1 diskutiert wird.

Die Wachstumsstadien 3 und 5 unterscheiden sich vom Stadium 4 in der physiologischen Entwicklung der Blätter (Länge und Breite der Blätter), deren Anzahl und der Länge der einzelnen Triebe. Spektral entscheidend ist dabei die resultierende Blattoberfläche, die den Chlorophyllgehalt des Bestandes bestimmt sowie die Bestandshöhe, die zusammen mit der Blattoberfläche auch die Intensität der Volumenstreuung bestimmt. Wachstumsstadium 6 ist vor allem durch die Entwicklung der Ähren gekennzeichnet. In diesem Stadium sind die drei Getreidearten visuell durch ihre Ähren gut zu unterscheiden: Winterweizen hat keine Grannen, Winterroggen ca. 5 cm und Wintergerste ca. 9 cm lange Grannen. Bei Winterweizen sind im Stadium 6 nur vergleichsweise geringe spektrale Unterschiede (leicht geringere BRF-Werte bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm sowie leicht geringere Varianz dieser BRF-Werte zwischen allen simulierten Beständen) zum Stadium 3, 4 und 5 festzustellen. Hingegen sind bei Winterroggen und Wintergerste große spektrale Unterschiede (geringere BRF-Werte bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm sowie geringere Varianz dieser BRF-Werte zwischen allen simulierten Beständen) festzustellen. Der Grund sind die Ähren. Ihre Grannen bewirken zum einen eine stärkere Streuung der Strahlung, so dass weniger Strahlung direkt reflektiert wird, zum anderen sind die Ähren und die Grannen lichtundurchlässig, so dass ein Teil der im Bestand auftretenden Volumenstreuung von den Ähren zurückgehalten wird. Abb. 5.4 zeigt einen Querschnitt entlang der Hauptebene der BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm für Wachstumsstadium 4 und 6 der Wintergerste. Die Abbildungen für alle weiteren simulierten Wachstumsstadien und Getreidearten sind im Anh. B zu finden.

5.2 Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die BRDF

5.2.1 Reihenabstand und relative Reihenorientierung

Der Reihenabstand und die relative Reihenorientierung haben einen starken Einfluss auf die Struktur des Bestandes. Je weiter der Reihenabstand ist, desto größere Lücken entstehen zwischen den Pflanzenreihen, da die Pflanzen die Lücke nicht mehr komplett überschirmen. Sowohl bei Nadirbeobachtungen als auch bei Schrägblickbeobachtungen (engl. *off-nadir view*) in Richtung der Reihenorientierung ist deswegen der Boden stärker sichtbar. Dieser Effekt ist

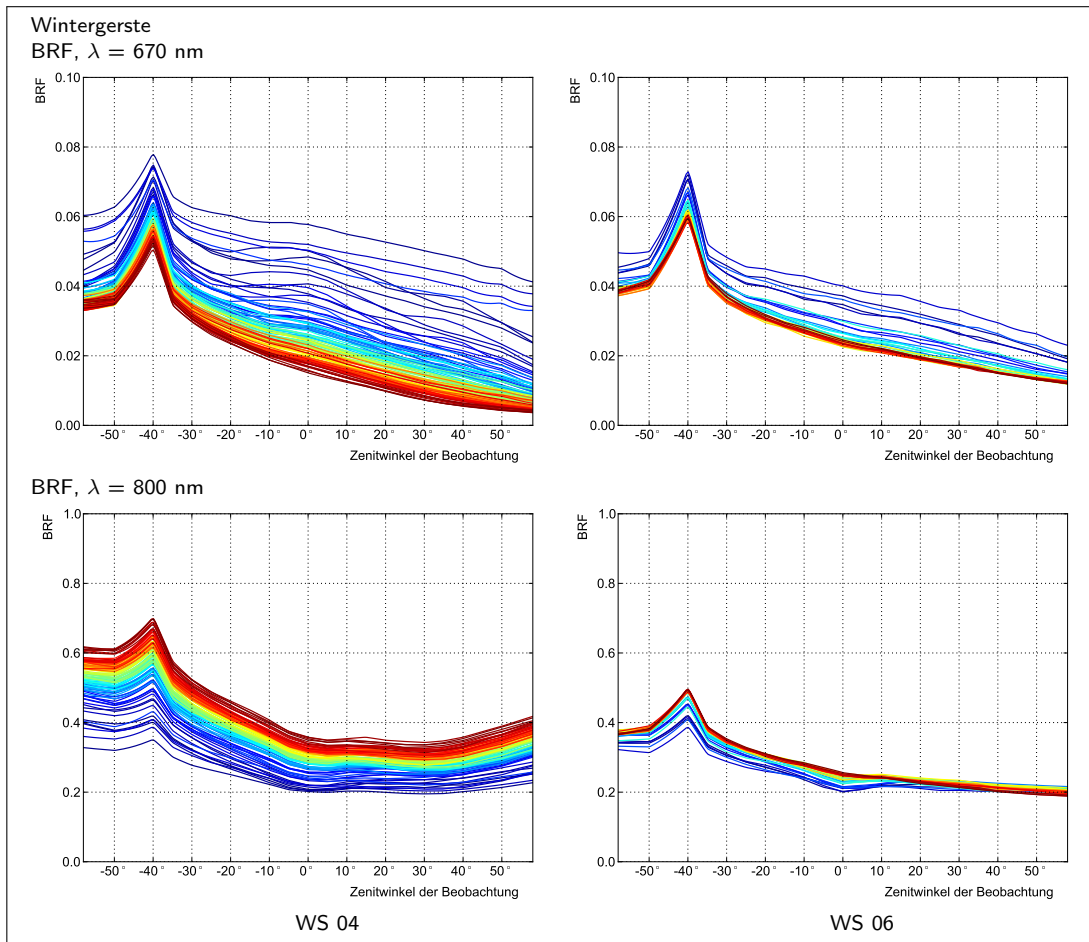


Abb. 5.4 – Querschnitt entlang der Hauptebene der BRDF bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ und bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ von 36 simulierten Wintergerste-Beständen im Wachstumsstadium 4 und 6 (TPP: 3-5; PPM: 9, 12, 15; RA: eng, mittel, weit; RRO: 0° , 30° , 60° , 90°). Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

auch in der BRDF festzustellen. Abb. 5.5 zeigt die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ und $\lambda = 800 \text{ nm}$ für verschiedene Bestände des Winterweizens mit einer relativen Reihenorientierung von 60° (siehe auch Anh. B). Deutlich zu erkennen ist die relative Orientierung der Reihen bei den Beständen mit weiten Reihenabstand sowohl bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ als auch bei $\lambda = 800 \text{ nm}$. Bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ sind die Werte höher, da der Boden in diesem Wellenlängenbereich stärker reflektiert, und bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ sind die Werte niedriger, da das Signal des Bodens in diesem Wellenlängenbereich niedriger ist. Bei den Beständen mit mittlerem Reihenabstand beeinflusst das Bodensignal zwar die BRDF, aber man kann die relative Orientierung der Reihen nicht mehr eindeutig erkennen. Bei den Beständen mit engem Reihenabstand tritt keine durch die Reihenorientierung bedingte Anisotropie auf. Diese Bestände sind so dicht, dass sie in allen Beobachtungsrichtungen homogen erscheinen. Die Anisotropie in diesen Beständen ist dann vor allem durch die Blattstellung und Blatthaltung der Pflanzen bestimmt.

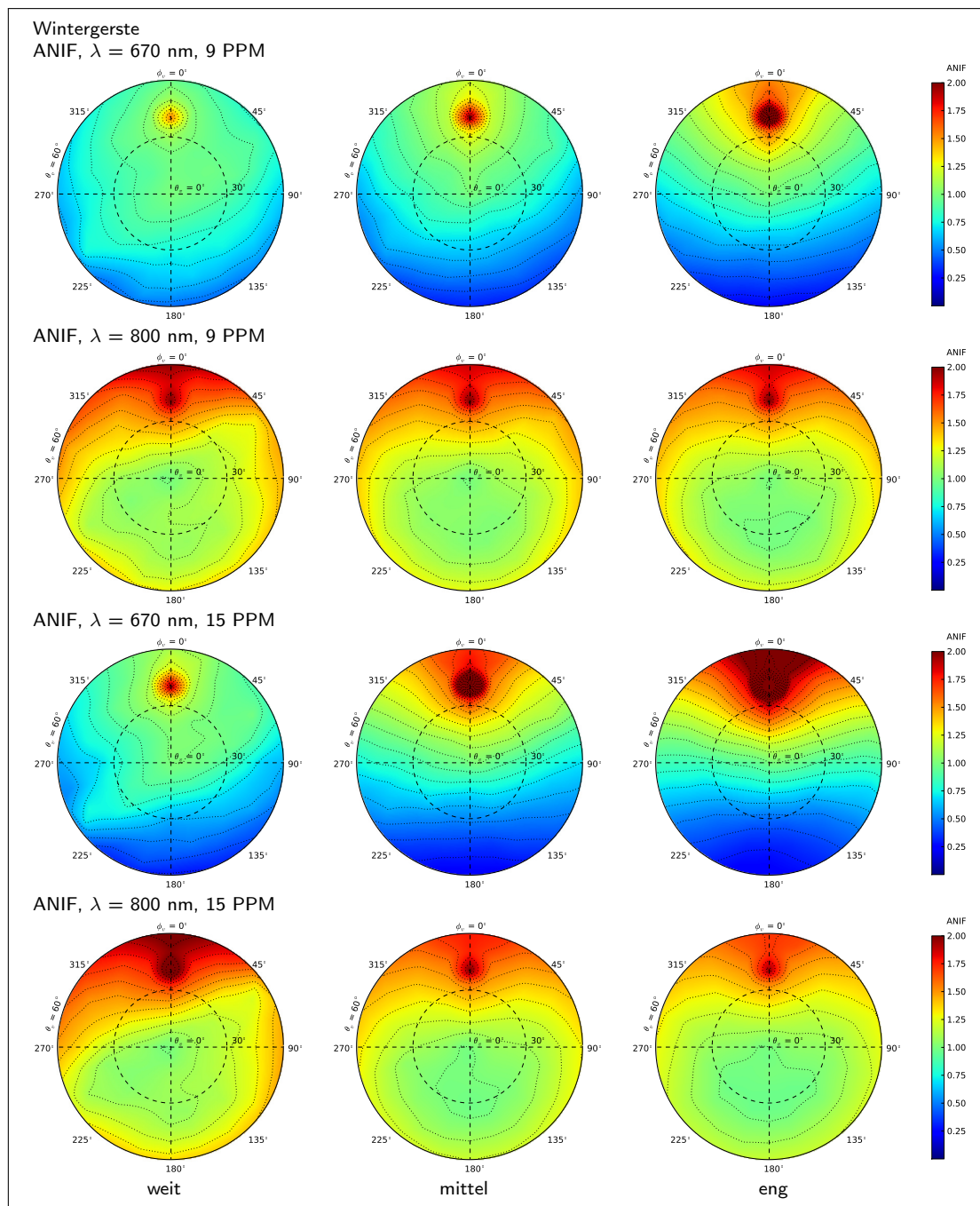


Abb. 5.5 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit $RRO = 60^\circ$, mit relativ wenig Pflanzen pro Reihe und Meter (9 PPM) und mit relativ vielen Pflanzen pro Reihe und Meter (15 PPM) sowie mit weitem, mittlerem und engem RA. Gut sichtbar ist der Einfluss des RA entlang der RRO in den Beständen mit weitem RA durch deutlich höhere Werte.

Tab. 5.1 – Einfluss des RA auf die BRDF der verschiedenen Bestände der drei Getreidearten. Kategorisiert durch visuelle Auswertung der BRDF-Abbildungen: + RA beeinflusst so stark, dass die RRO in der BRDF sichtbar wird; * RA beeinflusst die BRDF, aber die RRO ist nicht eindeutig zu erkennen; – RA hat keinen eindeutig sichtbaren Einfluss auf die BRDF. Die Einflusspunkte sollen ein Maß für die Vergleichbarkeit darstellen. Für jedes + gibt es 2 Punkte und für jeden * 1 Punkt. Je mehr Punkte umso stärker ist der Einfluss des RA und der RRO. Maximal sind 24 Punkte möglich.

Bestandsmerkmale RRO	RA	PPM	Einfluss des RA und der RRO auf die BRDF					
			WB BRDF bei $\lambda = 670$ nm	WR	WW	WB BRDF bei $\lambda = 800$ nm	WR	WW
0°	weit	9-15	+	+	+	*	–	*
0°	mittel	9-15	*	*	+	–	–	–
0°	eng	9-15	*	–	*	–	–	–
30°	weit	9-15	*	*	*	+	*	+
30°	mittel	9-15	*	–	*	*	–	*
30°	eng	9-15	–	–	–	–	–	–
60°	weit	9-15	+	*	+	+	*	+
60°	mittel	9-15	*	–	*	*	–	*
60°	eng	9-15	–	–	–	–	–	–
90°	weit	9-15	+	*	+	*	*	*
90°	mittel	9-15	–	–	–	–	–	–
90°	eng	9-15	–	–	–	–	–	–
Einflusspunkte			11	6	12	8	3	8

Tab. 5.1 gibt einen Überblick, bei welchen simulierten Beständen der Einfluss des Reihenabstands in der BRDF festzustellen war. Die Kategorisierung basiert hierbei auf einer visuellen Auswertung. Der Einfluss des Reihenabstands auf die Anisotropie der BRDF bei $\lambda = 670$ nm gilt bei allen drei Getreidearten für die Bestände mit weitem Reihenabstand, bei Wintergerste und -weizen auch für die Bestände mit mittlerem Reihenabstand. Bei Wintergerste und -weizen ist in den Beständen mit weitem Reihenabstand für jeden Winkel die relative Reihenorientierung eindeutig zu erkennen. Bei Winterroggen wird zwar ein Einfluss auf die BRDF deutlich, aber die relative Reihenorientierung lässt sich daraus nicht ableiten. Bei Wintergerste und -weizen gilt dies für die Bestände mit mittlerem Reihenabstand genauso, allerdings nicht bei $RRO = 0^\circ$. In diesem Fall ist die Sonneneinstrahlung parallel zur relativen Reihenorientierung. Der Boden zwischen den Reihen wird direkt von der Sonne beleuchtet und reflektiert ein helleres Signal, so dass sogar bei engem Reihenabstand ein Einfluss festzustellen ist. Bei $\lambda = 800$ nm ist der Einfluss des Reihenabstands auf die Anisotropie der BRDF allgemein geringer, da die Volumenstreuung der Vegetation das Bodensignal überlagert. Es fällt auf, dass die Einflüsse bei Wintergerste und Winterweizen in beiden Wellenlängenbereichen stärker sind als bei Winterroggen. Im roten Bereich liegt das am höheren Chlorophyllgehalt der Blätter, so dass das Vegetationssignal das des Bodens dominiert. Im NIR-Bereich wirkt eine stärkere Volumenstreuung, da die Winterroggenbestände eine größere Blattoberfläche haben (ca. 30 % mehr gegenüber Wintergerste und ca. 40 % mehr gegenüber Winterweizen), als die Bestände der beiden anderen Getreidearten. Die stärkere Volumenstreuung überlagert das Bodensignal noch mehr, so dass dessen Einfluss geringer ist. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Dichte der Pflanzen entlang einer Reihe nicht entscheidend ist. Der Einfluss des Reihenabstands ist sowohl bei einer niedrigen Anzahl PPM als auch bei einer hohen

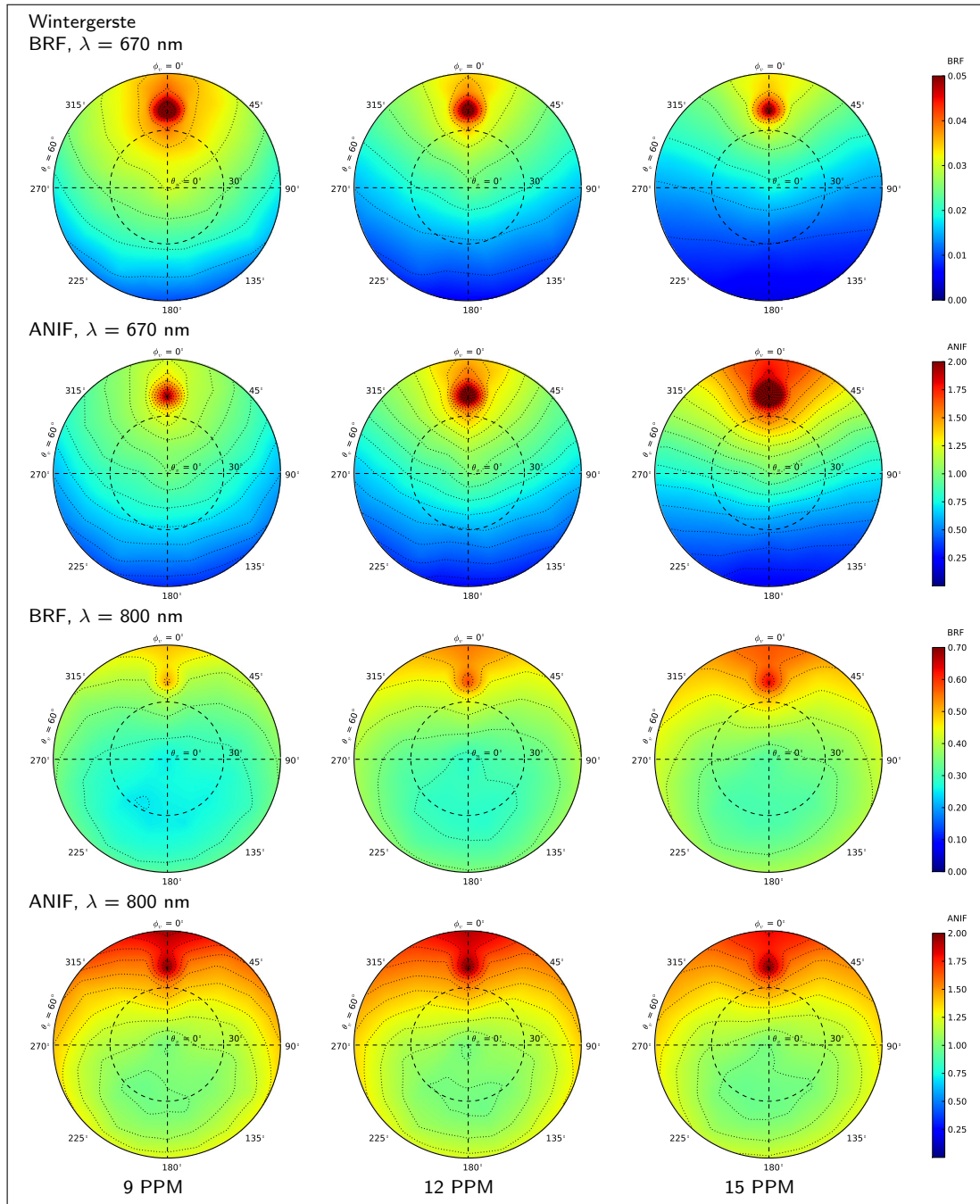


Abb. 5.6 – BRF- und ANIF-Werte bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit einem mittlerem RA und einer RRO = 30° mit 9 PPM, 12 PPM und 15 PPM.

Anzahl PPM festzustellen. Er ist jedoch unterschiedlich intensiv. Bei weitem Reihenabstand nimmt die Anisotropie leicht zu. Da der Reihenabstand so weit ist, kann sich die Vegetationslücke zwischen den Reihen trotz zunehmender Pflanzenzahl nicht schließen. Die zunehmende Anzahl an Pflanzen bewirkt dabei ein stärkeres Vegetationssignal neben dem Bodensignal, so dass die Anisotropie zunimmt. Bei mittlerem Reihenabstand nimmt die Anisotropie mit zunehmender Pflanzenanzahl pro Reihe leicht ab, da durch die natürliche Variabilität bei der Platzierung der Pflanzen die Vegetationslücke teilweise geschlossen wird und somit das Bodensignal geringer wird.

5.2.2 Anzahl der Pflanzen pro Reihe und Meter und Anzahl der Triebe pro Pflanze

Neben dem Reihenabstand haben auch die Anzahl der Pflanzen pro Reihe und Meter sowie die Anzahl der Triebe pro Pflanze einen Einfluss auf die Bestandsdichte. Je mehr Pflanzen in einer Reihe stehen und je mehr Triebe sie haben, desto dichter ist der Bestand. Je dichter ein Bestand ist, desto stärker wird das Bodensignal vom Reflexionssignal der Vegetation überlagert. Bei der BRDF äußert sich das im roten Wellenlängenbereich durch allgemein sinkende Reflexionswerte, wegen der zunehmenden Absorption von Chlorophyll, und im NIR-Bereich durch allgemein steigende Reflexionswerte aufgrund der zunehmenden Volumenstreuung.

In Abb. 5.6 sind jeweils die BRDF und deren ANIF-Werte für $\lambda = 670 \text{ nm}$ und $\lambda = 800 \text{ nm}$ für Wintergerstenbestände mit jeweils unterschiedlicher Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter gegenübergestellt (siehe auch Anh. B). Bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ ist eine Veränderung der allgemein elliptisch konvexen Form der BRDF zu einer parabolisch konvexen Form mit einem Wertegefälle entlang der Hauptebene zu beobachten. Zusätzlich nehmen die lokalen Maxima (im *Hotspot* und im Nadir) mit zunehmender Bestandsdichte ab. Bei der Anisotropie ist Ähnliches zu beobachten, außer dass hier das lokale Maximum im *Hotspot* mit zunehmender Bestandsdichte wächst. Bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ verändert sich die allgemein elliptisch konkave Form nur gering. Dasselbe ist auch bei der Anisotropie der BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ zu beobachten. Weiterhin ist mit zunehmender Bestandsdichte neben der Verformung der BRDF bei $\lambda = 670 \text{ nm}$ eine Abnahme und bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ eine Zunahme der Reflexionswerte festzustellen.

5.2.3 Einfluss des Bodens

Betrachtet man den Boden für sich ohne Pflanzenbewuchs, so kann man über die gesamte Hemisphäre der BRDF eines Bandes eine lineare Trendfläche mit einem Intensitätsgefälle beobachten. Die ANIF-Werte der BRDF variieren in den verschiedenen Wellenlängenbereichen nicht, da nur Reflexions- und Absorptionsprozesse bei Böden vorkommen, so dass die Geometrie des Modells relativ gesehen (der ANIF wird relativ zum Nadirwert bestimmt, siehe Gl. 2.13 in Abschn. 2.3) gleiche Auswirkungen auf die verschiedenen Wellenlängenbereiche hat. Aus Abb. 5.7 ist ersichtlich, dass der Anstieg der Trendfläche abhängig von der relativen Reihenorientierung ist. Bei $\text{RRO} = 0^\circ$ ist der Anstieg minimal und nimmt mit größer werdendem Winkel für die relative Reihenorientierung zu. Bei $\text{RRO} = 90^\circ$ ist der Anstieg maximal. Ebenso nimmt der Anstieg bei abnehmenden Reihenabstand zu (siehe Abb. 5.8). Die Orientierung des Gefälles ist dabei immer senkrecht zur relativen Reihenorientierung. Der Grund hierfür ist das Relief des Bodens (Reihenstruktur). Je größer der Winkel zwischen Einstrahlrichtung und Reihenorientierung ist, um so größere Schattenflächen entstehen auf der

Rückseite der angehäuften Reihen. Je nach Richtung werden dann unterschiedliche Anteile beleuchteter und beschatteter Flächen beobachtet. Nach dieser Theorie müsste der Anstieg bei $RRO = 0^\circ$ nicht nur minimal, sondern auch gleich 0 sein. Tatsächlich ist aber bei bestimmten Bodenmodellen ein geringer Anstieg feststellbar, denn neben dem relativ groben Bodenrelief bewirkt auch die feine Bodenstruktur (Körnigkeit und Aggregation) Schatteneffekte. Bodenstruktur und Bodenrelief sind somit der Grund für BRDF-Effekte auf vegetationslosen Flächen. Außerdem konnte festgestellt werden, dass sich die BRDF-Effekte mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel und mit abnehmenden Reihenabstand verstärken.

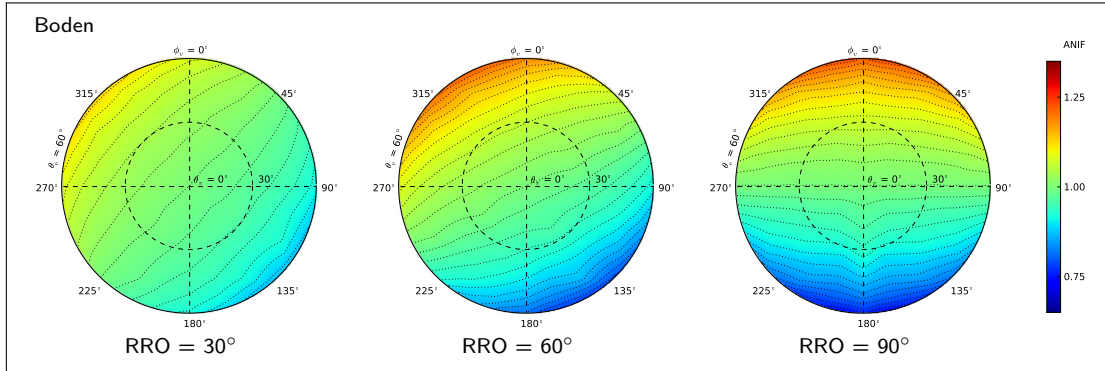


Abb. 5.7 – ANIF-Werte für ein Bodenmodell mit mittlerem RA und einer RRO von 30° , 60° und 90° ($\theta_s = 60^\circ$). Der Verlauf des Wertegefälle senkrecht zur RRO ist deutlich sichtbar.

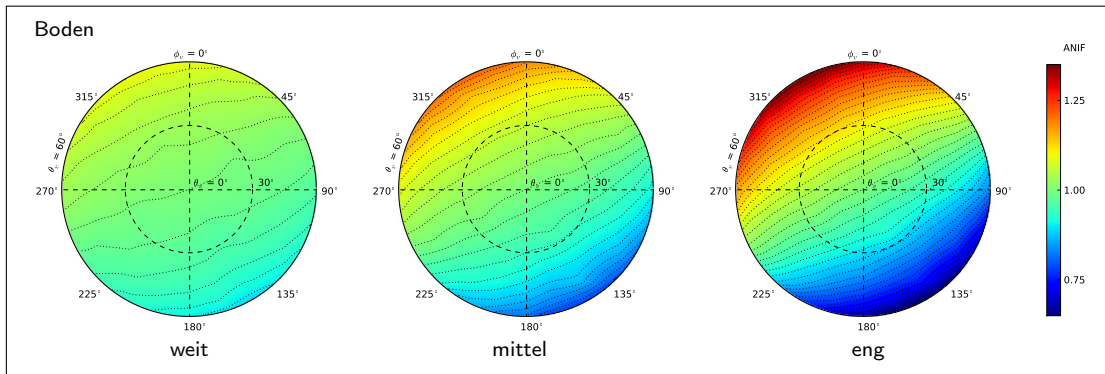


Abb. 5.8 – ANIF-Werte für ein Bodenmodell mit $RRO = 60^\circ$ und weitem, mittlerem und engem RA ($\theta_s = 60^\circ$). Der zunehmende Anstieg des Wertegefälles bei abnehmendem RA ist deutlich sichtbar.

Trotz der festgestellten BRDF-Effekte des Bodens sind dessen Einflüsse auf die BRDF der Getreidebestände im Wachstumsstadium 3 gering und ab Wachstumsstadium 4 nicht feststellbar. Zum einen sind die Effekte teilweise so gering, dass die natürliche Variation der Pflanzen- und Bestandsarchitektur (im Modell z.B. durch die Rotation der Pflanzen in einem zufälligen Winkel um ihre vertikale Achse und die zufällige Prototypenauswahl realisiert) einen größeren Einfluss hat. Zum anderen bewirkt die Vegetation eine diffuse Beleuchtung des Bodengrundes, so dass die Schatteneffekte keinen bzw. nur einen geringen Einfluss nehmen. Je dichter und je höher ein Vegetationsbestand ist, desto stärker ist der Effekt der

diffusen Bodenbeleuchtung (vgl. Abschn. 3.1.2).

5.2.4 Einfluss bei unterschiedlichen Wachstumsstadien

Die Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale treten in den unterschiedlichen Wachstumsstadien unterschiedlich stark auf. Entscheidend ist dabei der Bedeckungsgrad und die Höhe des Bestandes. Beide Faktoren wirken sich auf die Blattoberfläche aus, die zum einen den Chlorophyllgehalt des Bestandes bestimmt und zum anderen auch die Intensität der Volumenstreuung beeinflusst. Im Wachstumsstadium 3 ist der Einfluss des Reihenabstands feststellbar, die relative Reihenorientierung lässt sich weder in der BRDF bei $\lambda = 670$ nm noch bei $\lambda = 800$ nm ableiten. Die Pflanzen sind in diesem Stadium noch sehr niedrig und bilden zudem keine geschlossene Vegetation entlang der Reihen, so dass aus allen Beobachtungsrichtungen relativ ähnliche Situationen beobachtet werden und sich somit keine eindeutige Struktur in der BRDF bilden kann.

Wie auch im Stadium 4 sinken die BRF-Werte bei $\lambda = 670$ nm und steigen bei $\lambda = 800$ nm mit zunehmender Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter. Die Form der BRDF bleibt hingegen auch bei $\lambda = 670$ nm relativ unverändert. Im Wachstumsstadium 5 sind die gleichen Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale wie im Wachstumsstadium 4 zu beobachten, aber mit etwas geringerer Intensität. Bei weitem Reihenabstand ist in den meisten Beständen die relative Reihenorientierung ableitbar, wobei auch in diesem Stadium bei Wintergerste und -weizen stärkere Einflüsse als bei Winterroggen festgestellt wurden.

Beim Wachstumsstadium 6 lassen sich bei Wintergerste und Winterroggen nur geringe Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale feststellen. Die relative Reihenorientierung lässt sich auch bei den Beständen mit weitem Reihenabstand nicht ableiten und die BRF-Werte sinken bei $\lambda = 670$ nm bzw. steigen bei $\lambda = 800$ nm nur gering bei dichter werdendem Bestand. Wie schon in Abschn. 5.1.2 erläutert, erscheinen in diesem Stadium die Ähren. Die Ähren von Wintergerste und Winterroggen haben Grannen. Sie mindern zum einen den Einfluss der Volumenstreuung, so dass die BRF-Werte bei $\lambda = 800$ nm der unterschiedlichen Bestände nur wenig variieren, und zum anderen tragen sie zu einem höheren Bedeckungsgrad bei, so dass weniger Boden beobachtet wird. Die Ähren von Winterweizen haben keine Grannen. Im Wachstumsstadium 6 sind deshalb die Einflüsse der unterschiedlichen Bestandsstrukturmerkmale wie im Stadium 4 und 5 bei Winterweizen festzustellen, jedoch mit viel geringerer Intensität. Durch die Ähren ergibt sich ein deutlich größerer Bedeckungsgrad auch bei den Beständen mit weitem Reihenabstand, so dass zum Beispiel die relative Reihenorientierung nur noch bei Beständen mit geringerer Dichte (wenig PPM und wenig TPP) aus der BRDF ableitbar ist.

5.2.5 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die verschiedenen Bestandsstrukturmerkmale einen bedeutenden Einfluss auf die BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm haben. Es kommt zu lokalen (Einfluss von RA und RRO) und globalen (Einfluss von RA, PPM und TPP) Formveränderungen sowie zur Verschiebung der Funktion entlang der Kote (Einfluss von RA, PPM und TPP). Weiterhin wurde festgestellt, dass die BRDF bei $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm entsprechend den verschiedenen Wachstumsstadien unterschiedliche Formen an-

nimmt, so dass die einzelnen Wachstumsstadien getrennt untersucht und behandelt werden sollten. Der nächste Schritt wäre die Suche nach einer mathematischen Approximation der einzelnen Bänder der BRDF um in einem weiteren Schritt eine Korrekturfunktion zu finden, wie es auch bei bisherigen Arbeiten zur Korrektur von BRDF-Effekten in der Literatur zu lesen ist (z.B. Shibayama und Wiegand, 1985; Dymond und Qi, 1997 und Bryant et al., 2003). Anschließend könnten dann die entsprechenden Vegetationsindizes aus den korrigierten Bändern bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit ist hingegen die direkte Korrektur der aus der BRDF abgeleiteten Funktion des Vegetationsindex. Dafür sprechen zwei Gründe. Einerseits wird die Zahl der einflussnehmenden Fehler in der Prozesskette reduziert (Fehlerfortpflanzung), denn es muss nur eine Approximation durchgeführt werden, während bei der Korrektur der einzelnen Bänder der BRDF mehrere Approximationen (bei den in Abschn. 3.4 vorgestellten Vegetationsindizes sind es zwei: $\lambda = 670$ nm und $\lambda = 800$ nm) notwendig sind. Andererseits ist es möglich, dass die beschriebenen Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale in der aus der BRDF abgeleiteten Funktion der verschiedenen Vegetationsindizes gar nicht oder weniger stark abgebildet werden. Denn eine der Hauptaufgaben von Vegetationsindizes ist die Minimierung des Einflusses von Pflanzen- und Bestandsarchitektur (siehe Abschn. 3.4). Im Folgenden werden deshalb die Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die aus der BRDF abgeleiteten Funktion der verschiedenen Vegetationsindizes untersucht.

5.3 Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die VIDF

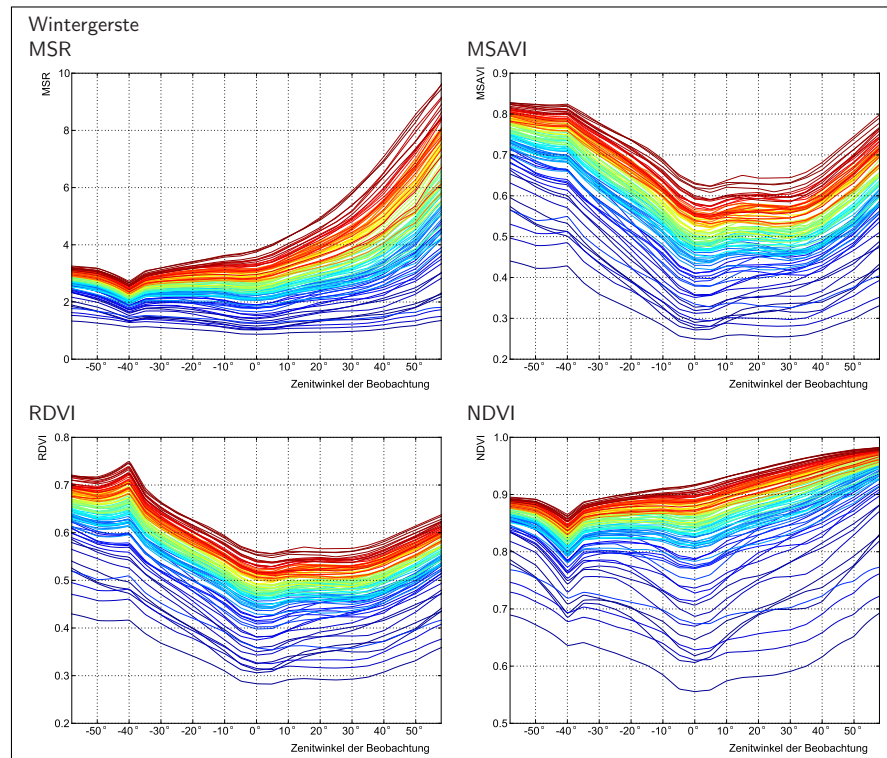
Die Berechnung eines Vegetationsindex aus einer BRDF führt zu einer neuen Funktion, die in dieser Arbeit Vegetationsindexfunktion (engl. *vegetation index distribution function*, VIDF) genannt wird. Jeder Vegetationsindex bewirkt eine charakteristische VIDF, die vor allem durch die unterschiedliche Berechnung bestimmt wird. Im vorangegangenen Abschnitt wurde festgestellt, dass die verschiedenen Bestandsstrukturmerkmale einen bedeutenden Einfluss auf die BRDF haben. Deshalb stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss die Bestandsstrukturmerkmale auf die VIDF der verschiedenen Indizes haben. Damit wird sich der folgende Abschnitt beschäftigen. Die Untersuchungen erfolgen für die in Abschn. 3.4 vorgestellten Vegetationsindizes, die aus einem rotem und einem NIR-Band bestimmt werden können.

5.3.1 Die verschiedenen VIDFs

Alle untersuchten VIDFs zeigen für die simulierten Bestände bei allen drei Getreidearten bei mittlerem Reihenabstand eine elliptisch konkave Form, wie sie auch bei der BRDF für $\lambda = 800$ nm in Abschn. 5.2.2 beobachtet wurde. Die Lage des Minimums und des Maximums variiert dabei entlang der Hauptachse. Die größte Varianz der Werte verläuft deshalb bei allen untersuchten VIDFs entlang der Hauptachse. Tab. 5.2 gibt einen Überblick zur Lage des Minimums und des Maximums der untersuchten VIDFs, die in 4 Gruppen zusammengefasst werden können. Bei der ersten Gruppe liegt ein lokales Minimum im *Hotspot* und eines im Nadir sowie das Maximum im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung. Die Werte entlang der Hauptebene sind durch eine hohe Varianz gekennzeichnet. Bei der zweiten Gruppe befindet sich das Minimum im Nadir und das Maximum im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung. Eine Besonderheit in dieser Gruppe ist, dass der *Hotspot* stark geglättet wird, während er bei allen anderen VIDFs deutlich hervor tritt. Bei der dritten Gruppe liegt das Minimum

Tab. 5.2 – Lage des Minimums und des Maximums der untersuchten VDFs.

Gruppe	VDF	Lage des Minimums	Lage des Maximums
1	SR	im <i>Hotspot</i> und im Nadir	im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung
	MSR	im <i>Hotspot</i> und im Nadir	im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung
2	OSAVI	im Nadir	im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung
	MSAVI	im Nadir	im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung
3	DVI	im Nadir	im <i>Hotspot</i>
	RDVI	im Nadir	im <i>Hotspot</i>
4	NDVI	im <i>Hotspot</i> im Nadir	im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung
	WDRVI	im <i>Hotspot</i> im Nadir	im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung

**Abb. 5.9** – Querschnitt entlang der Hauptebene der VDF von MSR, MSAVI, RDVI und NDVI aller simulierten WB04-Bestände. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

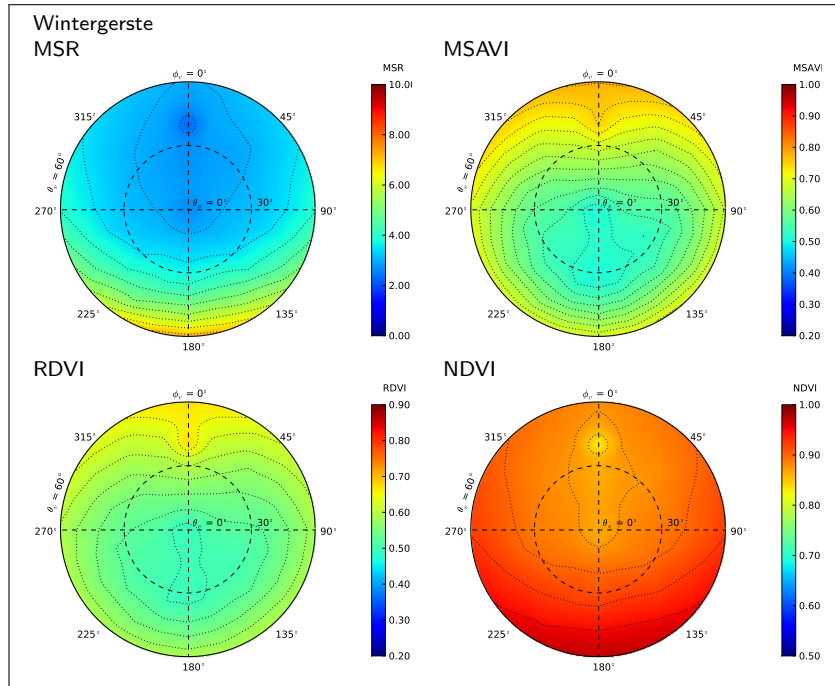


Abb. 5.10 – VIDF von MSR, MSAVI, RDVI und NDVI eines Wintergerstebestandes mit mittlerem RA, $RRO = 90^\circ$ und 13 PPM.

im Nadir und das Maximum im *Hotspot*. Bei der vierten Gruppe befindet sich ein lokales Minimum im *Hotspot* und eines im Nadir sowie das Maximum, wie bei der ersten Gruppe, im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung. In dieser Gruppe ist die Varianz der Werte entlang der Hauptebene deutlich niedriger. Abb. 5.9 zeigt den Querschnitt entlang der Hauptachse und Abb. 5.10 eine VIDF für jeweils einen Index aus jeder Gruppe.

5.3.2 Reihenabstand und relative Reihenorientierung

Eine der sechs Hauptaufgaben von Vegetationsindizes ist die Minimierung des Einflusses von Pflanzen- und Bestandsarchitektur (siehe Abschn. 3.4). Die Untersuchung der verschiedenen VIDFs der simulierten Getreidebestände zeigt jedoch, dass vor allem der Reihenabstand und die relative Reihenorientierung einen Einfluss auf deren Form haben. Tab. 5.3 gibt einen Überblick zu den Einflüssen von Reihenabstand und relativer Reihenorientierung auf die verschiedenen VIDFs. Die Einflüsse variieren sehr in Abhängigkeit vom Reihenabstand. Wie auch bei der BRDF festgestellt wurde, sind die Einflüsse bei einem weiten Reihenabstand enorm und bei einem engem Reihenabstand nicht feststellbar. Bei allen untersuchten Indizes lässt sich bei den Beständen mit weitem Reihenabstand die relative Reihenorientierung aus der VIDF visuell ableiten, mit Ausnahme der Winterroggenbestände. Bei diesen Beständen wurde schon bei der BRDF nur ein geringer Einfluss des Reihenabstands festgestellt. Es fällt auf, dass die VIDFs der einzelnen Gruppen auf ähnliche Weise durch den Reihenabstand und die relative Reihenorientierung beeinflusst werden. Gruppe drei (DVI und RDVI) verringert die Einflüsse von Reihenabstand und relativer Reihenorientierung am stärksten, so dass bei

Tab. 5.3 – Einfluss des RA auf die VIDF der verschiedenen Bestände der drei Getreidearten. Kategorisiert durch visuelle Auswertung der VIDF-Abbildungen: + RA beeinflusst so stark, dass die RRO in der VIDF sichtbar wird; ** RA beeinflusst die VIDF, aber die RRO ist nicht eindeutig sichtbar; * RA beeinflusst die VIDF nur in den Beständen mit wenig PPM (ca. 9 – 11), in den Beständen mit vielen PPM ist kein eindeutiger Einfluss in der VIDF sichtbar; – RA hat keinen eindeutig sichtbaren Einfluss auf die VIDF. Die Einflusspunkte stellen ein Maß für die Vergleichbarkeit dar. Für jedes + gibt es 3 Punkte, für ** 2 Punkte und für * 1 Punkt. Je mehr Punkte umso stärker ist der Einfluss des RA und der RRO. Maximal mögliche Punktzahl: 36.

Bestandsmerkmale		Einfluss des RA und der RRO auf die VIDF							
RRO	RA	SR	MSR	OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI
Wintergerste									
0°	weit	+	+	+	**	–	**	+	+
0°	mittel	**	**	–	–	–	–	+	+
0°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
30°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
30°	mittel	**	**	*	**	**	**	*	*
30°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
60°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
60°	mittel	**	**	*	**	*	*	*	*
60°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
90°	mittel	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
Einflusspunkte		18	18	16	15	12	14	17	17
Winterroggen									
0°	weit	+	+	+	**	–	**	+	+
0°	mittel	*	–	–	–	–	–	–	*
0°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
30°	weit	**	+	+	+	**	+	+	+
30°	mittel	*	*	–	–	–	–	–	*
30°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
60°	weit	+	+	+	+	**	+	+	+
60°	mittel	*	*	*	*	–	–	*	*
60°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	weit	+	+	+	+	**	+	+	+
90°	mittel	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
Einflusspunkte		14	14	13	12	6	11	13	15
Winterweizen									
0°	weit	+	+	+	**	–	**	+	+
0°	mittel	+	**	–	–	–	–	**	+
0°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
30°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
30°	mittel	**	*	*	*	**	–	**	**
30°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
60°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
60°	mittel	**	*	*	–	*	–	*	*
60°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	weit	+	+	+	+	+	+	+	+
90°	mittel	–	–	–	–	–	–	–	–
90°	eng	–	–	–	–	–	–	–	–
Einflusspunkte		19	16	14	12	12	12	17	18
Gesamtpunkte		51	48	43	39	30	37	47	50

ca. zwei Dritteln der untersuchten Bestände visuell kein Einfluss feststellbar ist. Bei Gruppe zwei (OSAVI und MSAVI) sind bei ca. 60 % der untersuchten Bestände keine Einflüsse feststellbar. Nur die Indizes der ersten und vierten Gruppe (SR und MSR, NDVI und WDRVI) sind sehr sensitiv gegenüber dem Reihenabstand und der relativen Reihenorientierung. Bei beiden Gruppen sind mehr als 50 % der untersuchten Bestände beeinflusst. Abb. 5.12 zeigt den Einfluss des Reihenabstands auf die VIDF für jeweils einen Index aus jeder Gruppe.

Die Art des Einflusses ist bei den VIDFs aller Indizes gleich. Dabei ist die gesamte VIDF durch eine stärkere Anisotropie gekennzeichnet, da Reihenabstand und relative Reihenorientierung niedrigere Werte in dem von ihnen beeinflussten Bereich der VIDF bewirken. Ist der Einfluss stark genug (bei Beständen mit weitem Reihenabstand), bildet sich entlang der relativen Reihenorientierung eine Achse, die sich als Rumpf (bei 670 nm) bzw. als Rinne (bei 800 nm) abbildet, wenn man die Werte in 3D visualisiert. Abb. 5.11 zeigt eine solche VIDF in 2D und 3D. Bei den Indizes SR, MSR, NDVI und WDRVI ist der Einfluss sogar so stark, dass bei einer relativen Reihenorientierung von 0° kein *Hotspot* in der VIDF mehr festzustellen ist.

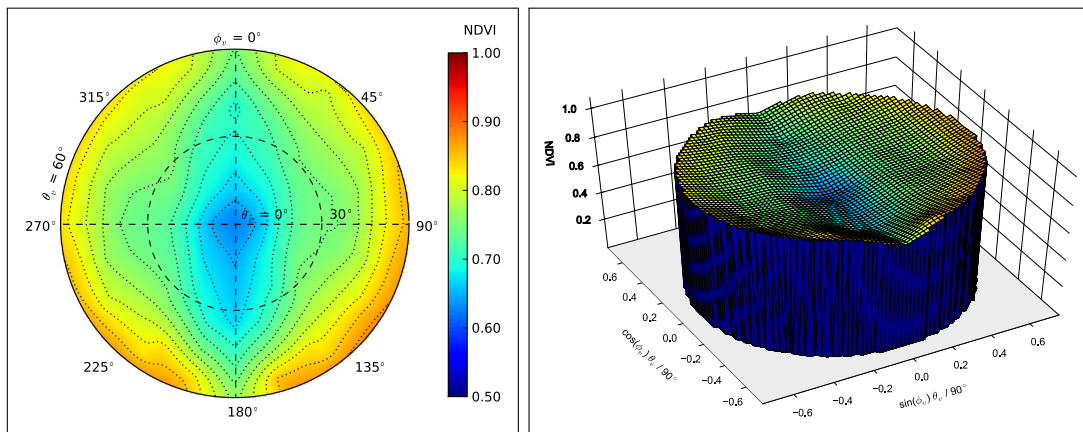


Abb. 5.11 – Einfluss des RA und der RRO auf die VIDF des NDVI in 2D und 3D für einen WB04-Bestand mit mittlerem RA, $RRO = 0^\circ$ und 13 PPM. Die RRO ist deutlich sichtbar.

5.3.3 Anzahl der Pflanzen pro Reihe und Meter und Anzahl der Triebe pro Pflanze

Bereits im vorherigen Kapitel wurde beschrieben, dass die Anzahl der Pflanzen pro Meter und die Anzahl der Triebe pro Pflanze in erster Linie die Bestandsdichte beeinflussen. Die zunehmende Bestandsdichte zeigt sich erwartungsgemäß auch in der VIDF der verschiedenen Indizes der drei Getreidearten, denn eine der Hauptaufgaben von Vegetationsindizes ist die Maximierung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich der grünen Vegetation. Ideal wäre eine einfache Erhöhung der Werte ohne relative Änderung der Form, da für eine Korrektur in diesem Fall lediglich eine lineare Beziehung notwendig ist. Bei MSAVI, DVI und RDVI verhält sich die VIDF relativ formstabil gegenüber Veränderungen der Bestandsdichte abgesehen von den Einflüssen bei weitem Reihenabstand (siehe Abschn. 5.3.2). In Abb. 5.13 ist

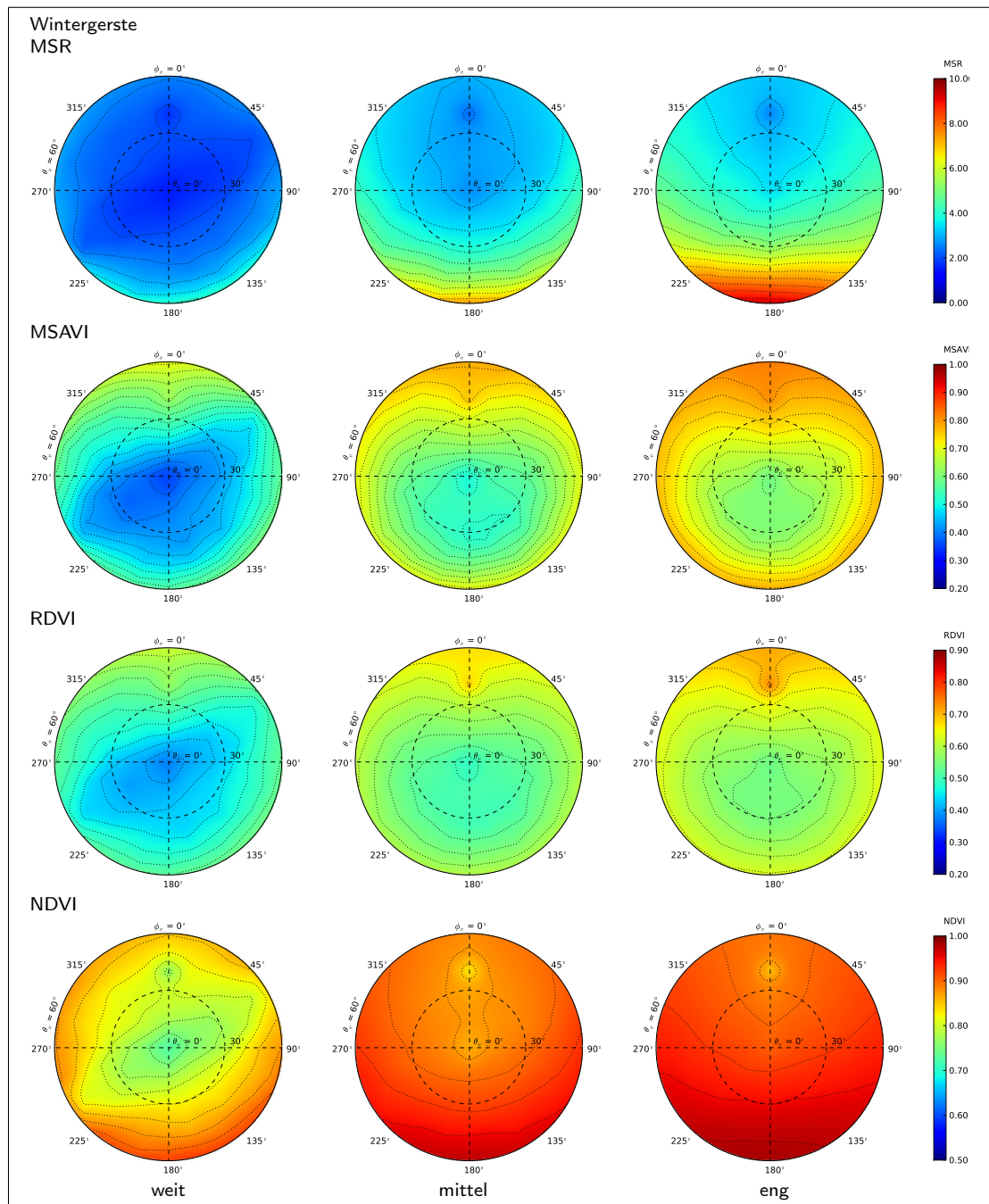


Abb. 5.12 – VDF des MSR, MSAVI, RDVI und des NDVI für WB04-Bestände mit unterschiedlichem RA, RRO = 60° und 13 PPM.

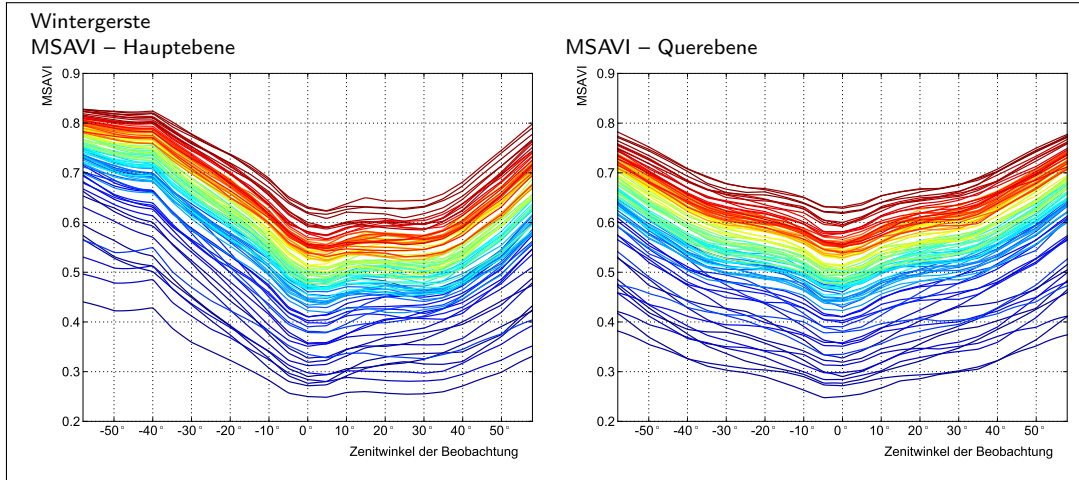


Abb. 5.13 – Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VIDF des MSAVI aller simulierten WB04-Bestände. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

ein Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VIDF des MSAVI aller simulierten Bestände der Wintergerste dargestellt. Die Kurven sind dem Farbverlauf folgend (niedrige Werte sind blau und hohe Werte sind rot) nach dem LAI der zugehörigen Bestände sortiert. Es zeigt sich eine Art Isolinienbild bei dem die einzelnen Kurven eine sehr ähnliche Form haben. Je höher dabei der LAI eines Bestands ist, desto höher ist die Kurve entlang der Ordinate (und die VIDF entlang der Kote) verschoben. Die Querschnitte der anderen beiden VIDFs sind zum Vergleich in Anh. B visualisiert.

Bei den VIDFs der anderen Indizes sind mit zunehmender Bestandsdichte, neben der Verschiebung der VIDF entlang der Kote, Formveränderungen festzustellen. Die VIDF des SR und des MSR verformen sich mit zunehmender Bestandsdichte zu einer parabolisch konkaven Fläche, wie schon bei der BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ in Abschn. 5.2.2 beobachtet wurde. Gleichzeitig nehmen die lokalen Extrema zu (lokales Minimum im *Hotspot*, lokales Minimum im Nadir und lokales Maximum im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung), was eine stärkere Anisotropie der VIDF bewirkt. Die Verformung der VIDF erfolgt ungleichmäßig entlang der Hauptachse. Während im Bereich der Rückwärtsstreuung nur geringe Formveränderungen auftreten, sind im Bereich der Vorwärtsstreuung mit zunehmendem Zenitwinkel stärkere Veränderungen bei zunehmender Bestandsdichte festzustellen. Die VIDF des OSAVI behält zwar mit zunehmender Bestandsdichte eine elliptisch konkave Form, doch die lokalen Extrema nehmen dabei ab (lokales Minimum im Nadir und lokales Maximum im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung). Dadurch wird eine geringere Anisotropie bei der VIDF bewirkt. Die VIDF des NDVI und des WDRVI verformen sich mit zunehmender Bestandsdichte zu einer parabolisch konkaven Fläche. Gleichzeitig lassen die lokalen Extrema nach (lokales Minimum im *Hotspot*, lokales Minimum im Nadir und lokales Maximum im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung), was eine geringere Anisotropie bei der VIDF bewirkt. In Abb. 5.14 ist ein Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VIDF des NDVI aller simulierten Bestände der Wintergerste dargestellt. Die Kurven sind dem Farbverlauf folgend (niedrige Werte sind blau und hohe Werte sind rot) nach dem LAI der zugehörigen Bestände sortiert.

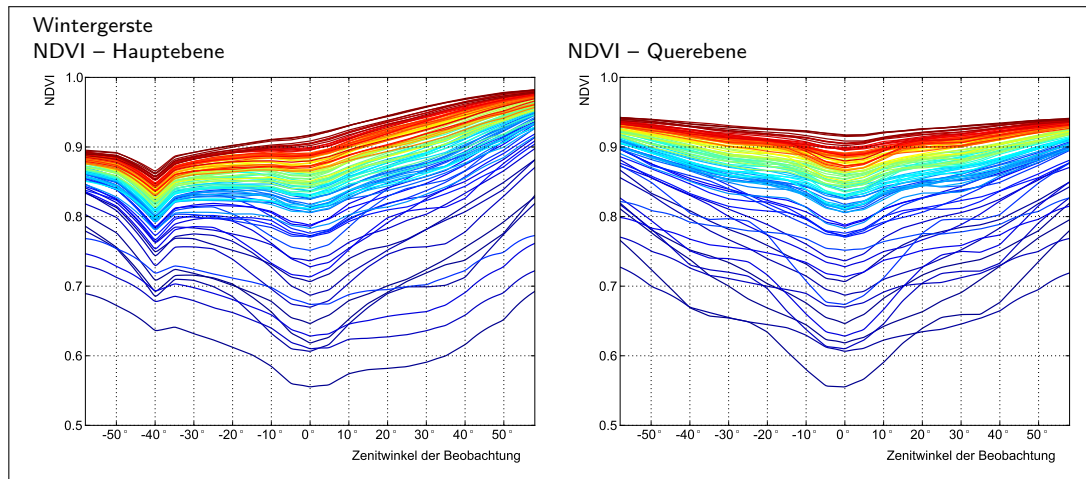


Abb. 5.14 – Querschnitt entlang der Haupt- und Querebene der VDF des NDVI aller simulierten WB04-Bestände. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

Auch hier zeigt sich eine Art Isolinienbild, jedoch nicht mit einer linearen Beziehung. Die Querschnitte der anderen beiden VDFs sind zum Vergleich in Anh. B visualisiert.

5.3.4 Einfluss bei unterschiedlichen Wachstumsstadien

Wie schon in den Abschn. 5.1.2 und 5.2.4 diskutiert, besteht der größte Unterschied zwischen den verschiedenen Wachstumsstadien in der Höhe und dem Bedeckungsgrad des Bestandes und der damit einhergehenden Blattoberfläche. Diese bestimmt den Chlorophyllgehalt und die Volumenstreuung. Im Wachstumsstadium 3 lassen sich die VDFs in nur 3 Gruppen gliedern. Bei der ersten Gruppe (SR, MSR, NDVI und WDRVI) liegt ein lokales Minimum im *Hotspot* und eines im Spiegelpunkt des *Hotspots* sowie das Maximum im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung. Die Varianz der Werte entlang der Hauptebene ist wegen des geringen Vegetationssignals auch bei SR und MSR nicht mehr stark, so dass die VDFs der vier Indizes (in Abschn. 5.3.1 getrennt in Gruppe 1 und Gruppe 4) zusammengefasst werden konnten. Bei der zweiten Gruppe (OSAVI und RDVI) befindet sich das Minimum im Spiegelpunkt des *Hotspots* und das Maximum im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung. Auffällig bei dieser Gruppe ist, dass der *Hotspot* nicht in der Form der VDF wiedergegeben wird. Bei der dritten Gruppe (MSAVI und DVI) liegt das Minimum im Spiegelpunkt des *Hotspots* und das Maximum im äußeren Bereich der Rückwärtsstreuung. Die VDFs der Gruppe 3 ähneln sehr denen der Gruppe 2, jedoch ist hier die Lage des *Hotspots* in der VDF zu erkennen. Lediglich bei sehr lichten Beständen ist das nicht möglich. Bei den Beständen mit weitem Reihenabstand ist ein leichter Einfluss des Reihenabstands und der relativen Reihenorientierung in den VDFs der verschiedenen Vegetationsindizes bei allen drei Getreidearten zu erkennen. Davon abgesehen sind keine weiteren auffälligen Formveränderungen zwischen den einzelnen VDFs der verschiedenen Bestände bei allen Vegetationsindizes festzustellen. Die VDF aller untersuchten Vegetationsindizes ist trotzdem entlang der Hauptebene durch eine starke Anisotropie gekennzeichnet. Weiterhin ist die VDF aller untersuchten Vegetati-

onsindizes bei den unterschiedlichen Beständen entlang der Kote verschoben, bedingt durch den unterschiedlichen Chlorophyllgehalt der einzelnen Bestände. Eine Korrektur ist demnach auch in diesem frühen Stadium notwendig, sollte aber wegen der relativ hohen Formstabilität bei allen Vegetationsindizes gut möglich sein.

In den Beständen des Wachstumsstadiums 5 sind die Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale in sehr ähnlicher Weise wie beim Wachstumsstadium 4 zu beobachten. Der Form nach lassen sich die VIDFs der verschiedenen Vegetationsindizes in die gleichen vier Gruppen unterteilen. Insgesamt sind die Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale im Wachstumsstadium 5 etwas geringer als im Stadium 4, da von den größeren Pflanzen mehr Bodenfläche überschirmt wird. Bei Wintergerste und Winterweizen wirken auch hier stärkere Einflüsse als bei Winterroggen.

Im Wachstumsstadium 6 lassen sich die VIDFs der untersuchten Indizes in nur noch zwei Gruppen gliedern. Bei der ersten Gruppe (SR, MSR, NDVI und WDRVI) liegt ein lokales Minimum im *Hotspot* und eines im Nadir sowie das Maximum im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung. Bei der zweiten Gruppe (OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI) befindet sich ein Minimum bei Beständen mit einem Bedeckungsgrad von unter ca. 80 % im Nadir und bei Beständen mit einem höheren Bedeckungsgrad im äußeren Bereich der Vorwärtsstreuung. Das Maximum befindet sich im *Hotspot*. Die Lage des *Hotspots* wird in diesem Stadium bei allen Vegetationsindizes aller drei Getreidearten in der VIDF wiedergegeben, auch in der VIDF von OSAVI und MSAVI. Und zwar ist der *Hotspot* ein Effekt der ersten Strahlungsinteraktion, die in diesem Stadium maßgeblich die Reflexion bestimmt, da die Volumenstreuung von den Ähren stark zurückgehalten wird (vgl. Abschn. 3.1.2). Bei den Beständen mit weitem Reihenabstand ist wie auch in Stadium 4 und 5 ein deutlicher Einfluss zu erkennen. Dabei lässt sich bei fast allen Beständen der drei Getreidearten mit weitem Reihenabstand die relative Reihenorientierung in den VIDFs der verschiedenen Vegetationsindizes erkennen. Der Einfluss der Bestandsdichte ist in diesem Stadium stärker als in den vorhergehenden, da weniger Volumenstreuung wirkt. Das lokale Minimum im Nadir glättet sich bei zunehmender Bestandsdichte, bis es bei den sehr dichten Beständen nicht mehr vorhanden ist. Die Form der VIDF verändert sich somit enorm. Dadurch wird die Korrektur selbst bei den formstabilsten Indizes OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI nur einen geringen Erfolg haben. Weiterhin wurde festgestellt: Die VIDF verschiebt sich entlang der Kote mit zunehmender Bestandsdichte, im Fall der Wintergerste bei den lichten bis mittel dichten Beständen (weiter bis mittlerer RA und wenig PPM und TPP), in dem des Winterroggens nur noch bei den sehr lichten Beständen (weiter RA und wenig PPM und TPP), was die Korrektur zusätzlich erschwert.

5.3.5 Fazit

Die VIDFs der untersuchten Vegetationsindizes zeigen alle eine charakteristische Form, die durch verschiedene Bestandsstrukturmerkmale sowohl lokal (Einfluss durch RA, und RRO) als auch global (Einfluss durch RA, PPM und TPP) beeinflusst wird. Allerdings bilden die VIDFs der verschiedenen Indizes den Einfluss der Bestandsstrukturmerkmale unterschiedlich ab. Es wurde festgestellt, dass die VIDFs von OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI relativ robust gegenüber den Einflüssen der untersuchten Bestandsstrukturmerkmale im Wachstumsstadium 3, 4 und 5 sind. Bei den VIDFs kann man sehen, dass auch hier die Form sehr stark vom Wachstumsstadium abhängt und diese deshalb getrennt untersucht und behandelt werden sollten. Die Frage ist nun, ob die unterschiedlichen VIDF-Formen trotz der Einflüsse

mathematisch beschrieben werden können, um eine allgemeine Korrekturfunktion definieren zu können. Schließlich soll jeder Bestand unabhängig von der Beobachtungsrichtung durch nur einen bestimmten Vegetationsindexwert beschrieben werden, idealerweise durch den Nadirwert. Im folgenden Kapitel wird eine Möglichkeit zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägsichtbeobachtungen mit Hilfe der in diesem Kapitel untersuchten VDFs vorgestellt.

6 Entwicklung einer Transformationsfunktion zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen

Die Minimierung des Einflusses der Aufnahmegeometrie und die der Pflanzen- und Bestandsarchitektur sind zwei der sechs Hauptaufgaben von Vegetationsindizes (siehe Abschn. 3.4). In Kap. 5 wurde jedoch gezeigt, dass die VIDFs der untersuchten Indizes durch beide Faktoren beeinflusst werden. In Anbetracht der zukünftigen EnMAP-Mission, bei der bedingt durch die geringe Schwadbreite von 30 km mittels stufenlosen Schwenken um bis zu $\pm 30^\circ$ quer zur Flugrichtung Schrägblickbeobachtungen aufgenommen werden, um eine hohe zeitliche Auflösung zu garantieren, ist es von Interesse, den Einfluss der variierenden Aufnahmegeometrie zu identifizieren und anschließend zu korrigieren. Das Ziel ist diesen Einfluss so zu korrigieren, dass der Wert der Nadir-Beobachtung bestimmt werden kann um somit die tatsächliche Veränderung des Vegetationssignals zu detektieren. Somit würden Szenen normiert werden, die durch unterschiedliche Beobachtungsgeometrien gekennzeichnet sind (z.B. Daten von flugzeuggetragenen Sensoren) sind und Szenen mit unterschiedlichen Beobachtungsgeometrien (z.B. von EnMAP) und ähnlichem Sonnenzenitwinkel wären vergleichbar.

Die Notwendigkeit, die Einflüsse der Beobachtungsgeometrie zu korrigieren, ist schon seit der Nutzung von Fernerkundungsdaten für quantitative Zwecke bekannt (Bryant et al., 2003). Seitdem wurden viele Methoden und Modelle entwickelt, um diesen Einfluss zu korrigieren. Die Information zur Korrektur wurde dabei sowohl aus gemessenen Daten (Labor- und Feldmessungen und/oder Fernerkundungsdaten, z.B. Shibayama und Wiegand, 1985; Jackson et al., 1990; Bryant et al., 2003 und Feingersh et al., 2010) als auch aus Reflexionsmodellen abgeleitet (z.B. Roujean et al., 1992 und Dymond und Qi, 1997). Darunter sind auch speziell für Grasland und Getreidefelder entwickelte Korrekturmodelle (z.B. Shibayama und Wiegand, 1985; Dymond und Qi, 1997 und Bryant et al., 2003). Diese setzen jedoch voraus, dass es sich um einen homogenen Vegetationsbestand handelt. Außerdem, wie auch schon in Abschn. 5.2.4 erörtert, ist es sinnvoll eine Korrektur direkt für einzelne Vegetationsindizes durchzuführen, wenn diese für die Auswertung der Daten benötigt werden. Denn dabei wird zum einen die Zahl der einflussnehmenden Fehler in der Prozesskette reduziert (Fehlerfortpflanzung) und zum anderen werden bei bestimmten Indizes (OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI) die Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale weniger stark abgebildet, als in den einzelnen Spektralbändern (Abschn. 5.3). Auch zu diesem Ansatz sind bereits Untersuchungen für landwirtschaftliche Bestände unternommen worden, jedoch lediglich für den NDVI und nur für jeweils ein bestimmtes Wachstumsstadium (Qi et al., 1995; Tang et al., 2004). In

diesem Kapitel wird nun eine Methode vorgestellt, die den Nadirwert eines Vegetationsindex einer Schrägblickbeobachtung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bestandsstrukturen umwandeln kann. Dies erfolgt am Beispiel der in Kap. 4 beschriebenen simulierten Reflexionsspektren von virtuellen Getreidebeständen (Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen) in unterschiedlichen Wachstumsstadien und auf Basis der im vergangenen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse. Anschließend wird die Transformationsfunktion auch für die simulierten Sensorspektren (EnMAP und Sentinel-2) aufgestellt um die Tauglichkeit für beide zukünftige Missionen zu testen und zu vergleichen.

6.1 Datenbasis

Für die Analyse wurden 224 verschiedene Bestände von Winterweizen im Wachstumsstadium 3 – 6 sowie von Wintergerste und Winterroggen im Wachstumsstadium 4 und 6 simuliert und von 61 verschiedenen Positionen aus mit Drat abgetastet. Es sind die selben Bestände, diesmal mit allen Merkmalskombinationen, die in Kap. 5 simuliert wurden, um eine möglichst große Varianz zu erhalten. Jedoch werden die Bestände mit engem Reihenabstand nicht bei der Entwicklung der Transformationsfunktion mit einbezogen, da diese Reihenabstände so nicht bei den Getreidebeständen in der Landwirtschaft vorkommen. Die Beobachtungspositionen sind auch dieselben wie in Kap. 5. Da EnMAP bis zu 30° schwenken kann und bei Sentinel-2 die äußeren Bildpixel im erweiterten Betriebsmodus unter einem Beobachtungszenitwinkel von bis zu 35° (bei normalen Betriebsmodus bis ca. 15°) aufgenommen werden können, sind nur die Beobachtungspositionen abgetastet worden, deren Zenitwinkel kleiner oder gleich 40° ist. Als Beleuchtungsposition wurde für alle Bestände ein Sonnenzenitwinkel von 40° verwendet. Um den Einfluss des *Hotspots* auf die Transformationsfunktion zu untersuchen, wurden die Winterweizenbestände zusätzlich mit einem Sonnenzenitwinkel von 30° abgetastet. Für die folgenden Abschnitte werden die simulierten Bestände der unterschiedlichen Getreidearten, Wachstumsstadien und Sonnenstände in die in Tab. 6.1 aufgelisteten Fälle untergliedert und benannt.

Tab. 6.1 – Übersicht zu den in diesem Kapitel untersuchten Fällen.

Fall	Getreideart	Wachstumsstadium	Sonnenzenitwinkel
WB04 40z	Wintergerste	4	40°
WB06 40z	Wintergerste	6	40°
WR04 40z	Winterroggen	4	40°
WR06 40z	Winterroggen	6	40°
WW03 30z	Winterweizen	3	30°
WW03 40z	Winterweizen	3	40°
WW04 30z	Winterweizen	4	30°
WW04 40z	Winterweizen	4	40°
WW05 30z	Winterweizen	5	30°
WW05 40z	Winterweizen	5	40°
WW06 30z	Winterweizen	6	30°
WW06 40z	Winterweizen	6	40°

Die Reflexionssimulation erfolgte wie schon in Kap. 5 nur für ausgewählte Bänder aus dem roten und dem NIR-Bereich, wobei jedoch viel mehr Bänder simuliert werden mussten (insgesamt 75 Bänder von 650 – 680 nm und von 784 – 900 nm jeweils mit einem SSI von 2 nm).

Bei einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von ca. 100 Prozessoren dauerten die Berechnungen aller Bestände für alle Beobachtungspositionen ca. 80 Tage. Auf die Berechnung des kompletten Wellenlängenbereichs (von 400 – 2450 nm mit einem SSI von 2 nm) wurde verzichtet, da sie hochgerechnet ca. 210 Tage benötigt hätte.

6.2 Entwicklung einer Transformationsfunktion

Trotz der vielen im vorangegangenen Kapitel untersuchten Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen auf die VIDF der verschiedenen Vegetationsindizes zeigte sich in den Querschnitten entlang der einzelnen Azimutrichtungen eine Art Isolinienbild. Daraus ergibt sich die Frage nach der Parameterfunktion, die diese Isolinien (die Querschnitte) bzw. Isoflächen (die gesamte VIDF) beschreibt, denn diese Funktion ist die gesuchte Funktion zur Bestimmung des Nadirwertes. Dafür muss zunächst untersucht werden wie genau die einzelnen VIDFs mathematisch beschrieben werden können. Dafür ergeben sich zwei Strategien: die Approximation der gesamten VIDF mittels einer Polynomflächenfunktion und die schrittweise Approximation der einzelnen Azimutrichtungen der VIDF mittels einer Polynomkurvenfunktion. Beide Strategien werden in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt. Anschließend werden die gefundenen Funktionen (Polynomflächen und Polynomkurven) der verschiedenen VIDFs genutzt, um eine allgemeine, alle VIDFs eines Wachstumsstadiums und einer Getreideart beschreibende, Funktion zu finden. Mit dieser neuen Funktion kann anschließend der Nadirwert in Abhängigkeit von der entsprechenden Beobachtungsposition sowie dem dazugehörigen VI-Wert bestimmt werden.

6.2.1 Polynomflächenapproximation

Jede VIDF ist durch die VI-Werte von 61 unterschiedlichen Beobachtungen zwischen $\theta_v = 0^\circ$ und $\theta_v = 40^\circ$ beschrieben. Die Lage jeder Beobachtung ist durch Azimut- ϕ und Zenitwinkel θ der Beobachtungsposition auf der Hemisphäre über dem Ziel definiert. Die gegebenen Daten in Form von $VI_1 = VI(\theta_1, \phi_1), \dots, VI_N = VI(\theta_N, \phi_N)$ werden zunächst mittels

$$\begin{aligned} x(\theta, \phi) &= \frac{\theta}{90} \cdot \cos \phi \\ y(\theta, \phi) &= \frac{\theta}{90} \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (6.1)$$

in kartesische Koordinaten überführt: $VI_1 = VI(x_1, y_1), \dots, VI_N = VI(x_N, y_N)$. Nun wird nach einem funktionalem Zusammenhang in Form von

$$VI(x, y) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L a_{kl} \cdot x^k \cdot y^l, \quad \text{mit } (K \cdot L) + 3 \leq N \quad \begin{cases} l = 0 & \text{wenn } k = K, \\ k = 0 & \text{wenn } l = L, \end{cases} \quad (6.2)$$

gesucht (Wälder, 2008), so dass folgende notwendige Bedingung erfüllt ist (Wälder, 2008):

$$F(a_{kl} : k = 0 \dots K, l = 0 \dots L) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L a_{kl} \cdot x_i^k \cdot y_i^l - VI_i \right)^2 \rightarrow \min_{a_{kl} : k=0 \dots K, l=0 \dots L} \quad (6.3)$$

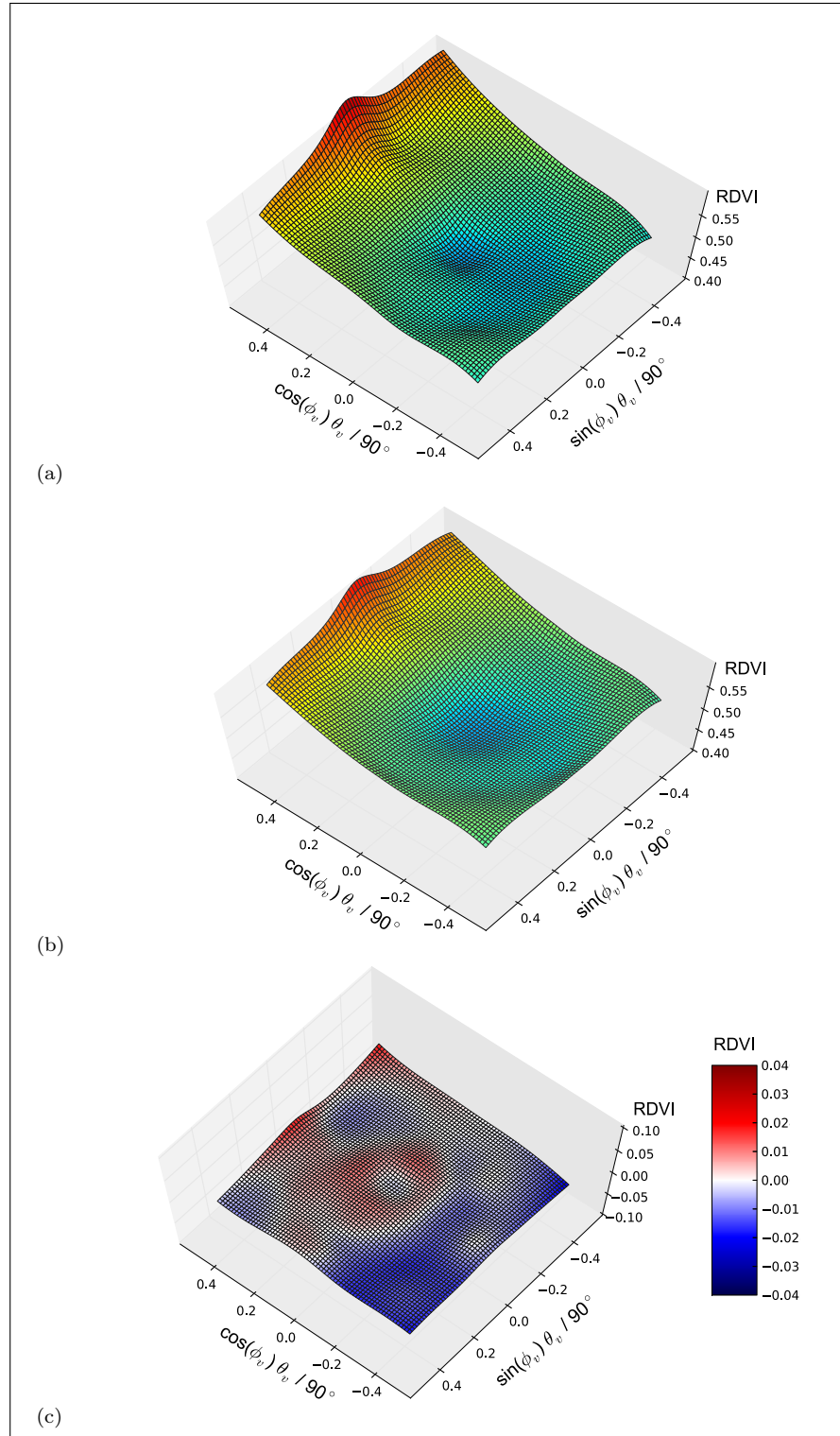


Abb. 6.1 – Darstellung der (a) Original-VDF, (b) der approximated Fläche mit einem Flächenpolynom 6. Grades sowie (c) der Differenz der beiden Flächen des RDVI für einen WB04-Bestandes mit mittlerem RA, RRO=30° und 13 PPM.

Abb. 6.1 zeigt ein Beispiel für eine Originalfläche des RDVI und der darauf approximierten Fläche sowie der Differenz aus beiden Flächen.

6.2.2 Schrittweise Polynomkurvenapproximation

Wie in Kap. 5 festgestellt, wird sich nicht jede VIDF mit einer Polynomflächenapproximation hinreichend beschreiben lassen. Für diesen Fall könnte eine lokale Betrachtung der VIDF von Vorteil sein. Am sinnvollsten erweist sich hierfür die getrennte Betrachtung der einzelnen Azimutrichtungen der VIDF. Dabei erfolgt vom Nadir ausgehend ein Schnitt entlang der zu approximierenden Azimutrichtung durch die VIDF. Die resultierende Kurve einer bestimmten Azimutrichtung ϕ ist gegeben durch: $VI_1 = VI(\theta_1), \dots, VI_N = VI(\theta_N)$, indem die entsprechenden Werte aus den 61 Beobachtungspositionen durch die jeweils 5 nächstliegenden mit der Methode der inversen Distanzgewichtung (engl. *inverse distance weighted*, IDW) ermittelt wurden. Anders als bei der Polynomflächenapproximation muss hier nicht in kartesische Koordinaten überführt werden, da die Zenitwinkel entlang der Abszisse und die VI-Werte entlang der Ordinate abgetragen werden können. Nun wird auch hier nach einem funktionalen Zusammenhang in Form von

$$VI_\phi(\theta) = a_M \cdot \theta^M + a_{M-1} \cdot \theta^{M-1} + \dots + a_1 \cdot \theta + b, \quad \text{mit } M \leq N - 1 \quad (6.4)$$

gesucht (Wälder, 2008), so dass folgende notwendige Bedingung erfüllt ist (Wälder, 2008):

$$F(a_1, \dots, a_M, b) = \sum_{i=1}^N (a_M \cdot \theta_i^M + \dots + a_1 \cdot \theta_i + b - VI_i)^2 \rightarrow \min_{a_1, \dots, a_M, b}. \quad (6.5)$$

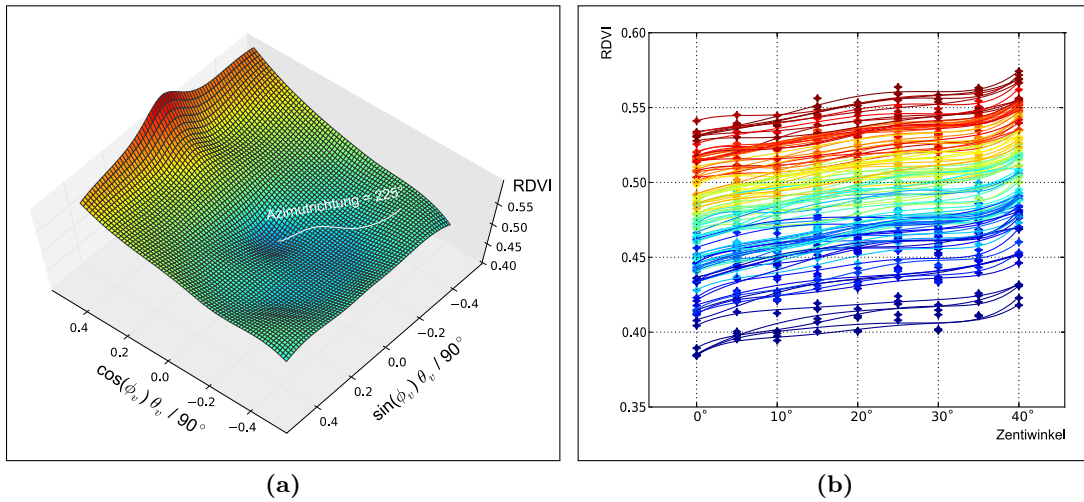


Abb. 6.2 – Visualisierung der schrittweisen Polynomapproximation. Dargestellt ist in (a) die Lage des Querschnitts auf der VIDF des RDVIs in Richtung des Azimutwinkels von 225° für einen WB04-Bestand mit mittlerem RA, $RRO=30^\circ$ und 13 PPM und in (b) der Querschnitt entlang des Azimutwinkels von 135° für mehrere WB04-Bestände mit mittlerem RA.

Abb. 6.2 zeigt für einen Schritt als Beispiel die Lage des Querschnitts auf der VIDF des RDVI in Richtung des Azimutwinkels von 225° sowie des Querschnitt selbst für mehrere WB04-Bestände.

6.2.3 Ergebnisse der Approximation

Von jedem simulierten Bestand in jedem definiertem Fall wurde jede VIDF der acht untersuchten Vegetationsindizes nach beiden beschriebenen Strategien approximiert. Die Polynomordnung wurde dabei solange erhöht bis das Bestimmtheitsmaß R^2 nicht mehr anstieg, der mittlere quadratische Fehler (engl. *root mean square error*, RMSE) nicht mehr sank und der Genauigkeitsfaktor ACC (Gln. 6.6 und 6.7) um ein Vielfaches größer war als $VI_{max} - VI_{min}$. Nur dann kann eine gute Approximation angenommen werden, die die Struktur der Daten bestmöglich wiedergibt (Wälder, 2008). Der Genauigkeitsfaktor für die Polynomflächenapproximation kann mit

$$ACC_{2D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L a_{kl} x_i^k y_i^l - VI_i \right)^2}, \quad \text{mit } (K \cdot L) + 3 \leq N \quad \begin{cases} l = 0 & \text{wenn } k = K \\ k = 0 & \text{wenn } l = L \end{cases}, \quad (6.6)$$

bestimmt werden und der für die Polynomkurvenapproximation mit

$$ACC_{1D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_M \theta^M + a_{M-1} \theta^{M-1} + \dots + a_1 \theta + b - VI_i)^2}, \quad \text{mit } M \leq N - 1. \quad (6.7)$$

Anschließend wurden die Werte jedes Vegetationsindex für jeden Fall arithmetisch gemittelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Approximation vorgestellt.

6.2.3.1 Polynomflächenapproximation

Drat:

Bei der Polynomflächenapproximation der unveränderten Simulationsdaten aus Drat ergaben die Polynome 6. Ordnung (PO) für alle Vegetationsindizes aller untersuchten Fälle die besten Werte (siehe Abb. 6.3). In Tab. 6.2 sind die Werte des Bestimmtheitsmaßes für alle Vegetationsindizes aller untersuchten Fälle aufgelistet sowie deren arithmetischer Mittelwert und die Varianz. Da die verschiedenen Indizes jeweils unterschiedliche Wertebereiche abbilden, eignet sich der RMSE nicht, um die Ergebnisse der verschiedenen Indizes miteinander vergleichen zu können. Deshalb wird in diesem Fall und im Folgendem beim Vergleich der verschiedenen Indizes miteinander das Bestimmtheitsmaß R^2 der Approximation genutzt. Mit einem durchschnittlichen Bestimmtheitsmaß von ca. 90 % und mehr lassen sich die VIDFs von DVI, MSAVI und RDVI am besten approximieren. Nicht so gute Ergebnisse liefern die Approximationen der VIDFs von NDVI, SR und MSR mit einem durchschnittlichen Bestimmtheitsmaß von unter 70 %. Neben den indexabhängigen Unterschieden gibt es auch bei einem Index zwischen den verschiedenen Fällen Unterschiede bei der Approximation. Die VIDF vom NDVI lässt sich z.B. in den beiden WW03-Fällen mit einem Bestimmtheitsmaß von fast 90 % sehr gut approximieren, während die VIDF bei WW05 30z und WW06 30z nur schlecht approximiert werden konnte. Ähnlich verhält es sich beim SR und beim MSR, nur dass hier die VIDFs jeweils anderer Fälle besser bzw. schlechter approximiert werden konnten (siehe

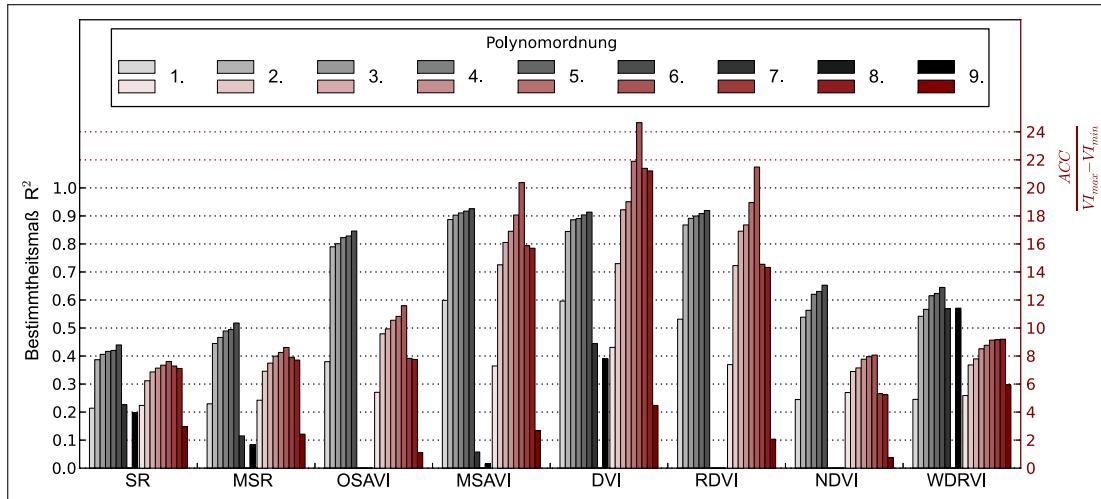


Abb. 6.3 – Vergleich des gemittelten Bestimmtheitsmaßes sowie des Genauigkeitsfaktors normiert mit $VI_{max} - VI_{min}$ für Polynome unterschiedlichem Grads bei der Polynomflächenapproximation der VIDFs aller untersuchten Vegetationsindizes vom Fall WB04 40z.

Tab. 6.2). Die geringste Varianz zwischen den Fällen ist beim RDVI festzustellen. Hier variiert das Bestimmtheitsmaß nur sehr wenig, während die Varianz bei SR, MSR und NDVI 10 bis 20-fach höher ist. Beim Vergleich der 30z- mit den 40z-Fällen sind keine eindeutigen Einflüsse festzustellen. Es zeigt sich jedoch eine Zweiteilung der Vegetationsindizes. Bei OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI können die VIDFs der 40z-Fälle etwas besser approximiert werden und bei SR, MSR, NDVI und WDRVI die 30z-Fälle.

Tab. 6.2 – Bestimmtheitsmaß der Polynomflächenapproximation 6. Grades für alle untersuchten Fälle.

Fall	SR	MSR	OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI	Mittelwert
WB04 40z	0.424	0.500	0.842	0.925	0.910	0.918	0.635	0.634	0.7235
WB06 40z	0.779	0.807	0.894	0.950	0.960	0.939	0.815	0.828	0.8715
WR04 40z	0.536	0.599	0.842	0.824	0.947	0.947	0.667	0.711	0.7591
WR06 40z	0.758	0.788	0.885	0.949	0.963	0.940	0.826	0.828	0.8671
WW03 30z	0.737	0.810	0.892	0.819	0.810	0.870	0.885	0.792	0.8269
WW03 40z	0.757	0.830	0.906	0.829	0.817	0.882	0.899	0.817	0.8421
WW04 30z	0.456	0.601	0.873	0.908	0.880	0.911	0.616	0.728	0.7466
WW04 40z	0.422	0.562	0.880	0.925	0.905	0.929	0.570	0.702	0.7369
WW05 30z	0.554	0.664	0.827	0.910	0.895	0.888	0.532	0.702	0.7465
WW05 40z	0.532	0.638	0.862	0.942	0.944	0.929	0.544	0.715	0.7633
WW06 30z	0.711	0.730	0.761	0.881	0.867	0.856	0.539	0.691	0.7545
WW06 40z	0.721	0.751	0.815	0.919	0.936	0.913	0.602	0.740	0.7996
Mittelwert	0.616	0.690	0.857	0.898	0.903	0.910	0.6783	0.741	0.7865
Varianz	0.0199	0.0122	0.0017	0.0024	0.0027	0.0009	0.0195	0.0028	

Der Blick auf den Einfluss der verschiedenen Bestandsstrukturmerkmale hat gezeigt, dass die VIDF der verschiedenen Indizes von Beständen mit einer relativen Reihenorientierung entlang der Hauptebene schlechter approximiert werden kann, als von den Beständen mit einer anderen relativen Reihenorientierung. Darüber hinaus zeigen sich sehr unterschiedliche Einflüsse bei den verschiedenen Vegetationsindizes. Tendenziell kann man sagen, dass sich die

Bestände mit weitem Reihenabstand nicht so gut approximieren lassen wie die mit mittlerem Reihenabstand unabhängig vom Fall. Bei RDVI und OSAVI zeigt sich zudem unabhängig vom Fall, dass der Einfluss der Reihenorientierung auf die Approximation größer ist als der Einfluss des Reihenabstands, während das bei den anderen Indizes von Fall zu Fall unterschiedlich ist.

EnMAP und Sentinel-2:

Sowohl bei EnMAP als auch bei Sentinel-2 weichen die gegenwärtig definierten Bandpositionen und Bandbreiten von den bisher untersuchten Bändern etwas ab. Für die Ableitung der verschiedenen VIDFs wurden bei den EnMAP-Daten die Bänder 47 ($\lambda_c = 671,97$ nm, FWHM = 7,94 nm) und 65 ($\lambda_c = 801,09$ nm, FWHM = 9,26 nm) genutzt und bei den Sentinel-2-Daten die Bänder 4 ($\lambda_c = 665$ nm, FWHM = 30 nm) und 8 ($\lambda_c = 842$ nm, FWHM = 115 nm). Band 7 ($\lambda_c = 783$ nm, FWHM = 20 nm) und 8a von Sentinel-2 ($\lambda_c = 865$ nm, FWHM = 20 nm) sind zwar schmaler und scheinen deshalb besser geeignet, aber sie haben ein niedrigeres SNR. Deshalb war in beiden Fällen eine geringere Approximationsgüte zu erwarten, was durch Stichproben bestätigt wurde. Wie auch bei den Originaldaten von Drat lieferte eine Polynomflächenapproximation 6. Grades für die VIDFs aus den Sensordaten bei allen Vegetationsindizes die besten Ergebnisse. Die Werte des Bestimmtheitsmaßes aller Fälle und aller Indizes der EnMAP-Daten sind nur minimal niedriger als die der Drat-Daten. Hingegen sind die Werte der Sentinel-2-Daten bei vier Indizes (SR, MSR, NDVI und WDRVI) sehr viel niedriger, eine Approximation ist also nur mit größeren Abweichungen möglich. Bei den anderen vier Indizes (OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI) sind die Werte mit einem durchschnittlichen Bestimmtheitsmaß von ca. 87 % nur etwas niedriger als bei den Drat-Daten. Der Grund hierfür ist das SNR der Daten. Während das SNR der EnMAP-Daten gut genug ist (Band 47: $\text{SNR} \cong 1:117$ bei $\text{BRF} \cong 0,05$; Band 65: $\text{SNR} \cong 1:308$ bei $\text{BRF} \cong 0,3$ (Segl, 2010)), um eine ähnliche Approximationsgüte zu erreichen wie bei den rauschfreien Originaldaten, reicht das SNR von Sentinel-2 (Band 4: $\text{SNR} \cong 1:8$ bei $\text{BRF} \cong 0,05$; Band 8: $\text{SNR} \cong 1:175$ bei $\text{BRF} \cong 0,3$ (Segl et al., 2006; Drusch et al., 2010)) dafür nicht aus. Die Tatsache der Zweiteilung der Indizes deutet darauf hin, dass die Indizes OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI robust gegenüber Rauschen in den Daten sind. In Abb. 6.4 ist das Rauschen in den Querschnitten des NDVI bei den Sentinel-2-Daten deutlich zu erkennen. Die Abb. 6.5 zeigt den direkten Vergleich des RMSE der Approximation für den DVI, als Beispiel aus der robusten Gruppe, und den NDVI, als Beispiel aus der sensitiven Gruppe. Es ist deutlich zu sehen, dass der RMSE beim DVI bei den Daten beider Sensoren sehr ähnlich ist und beim NDVI zwischen den Daten von EnMAP und Sentinel-2 starke Unterschiede auftreten.

Die bei den Drat-Daten festgestellten Unterschiede bei der Güte der Approximation zwischen den verschiedenen Indizes, den verschiedenen Fällen sowie den verschiedenen Sonnenzenitwinkel sind in ähnlicher Weise in den simulierten Sensordaten festzustellen. Diese Unterschiede sind somit unabhängig vom Sensor und daher auf die Pflanzenarchitektur und auf die Eigenschaften des jeweiligen Vegetationsindex zurückzuführen. Die Einflüsse der Bestandsstrukturmerkmale zeigen sich in ähnlicher Weise in den Sensordaten.

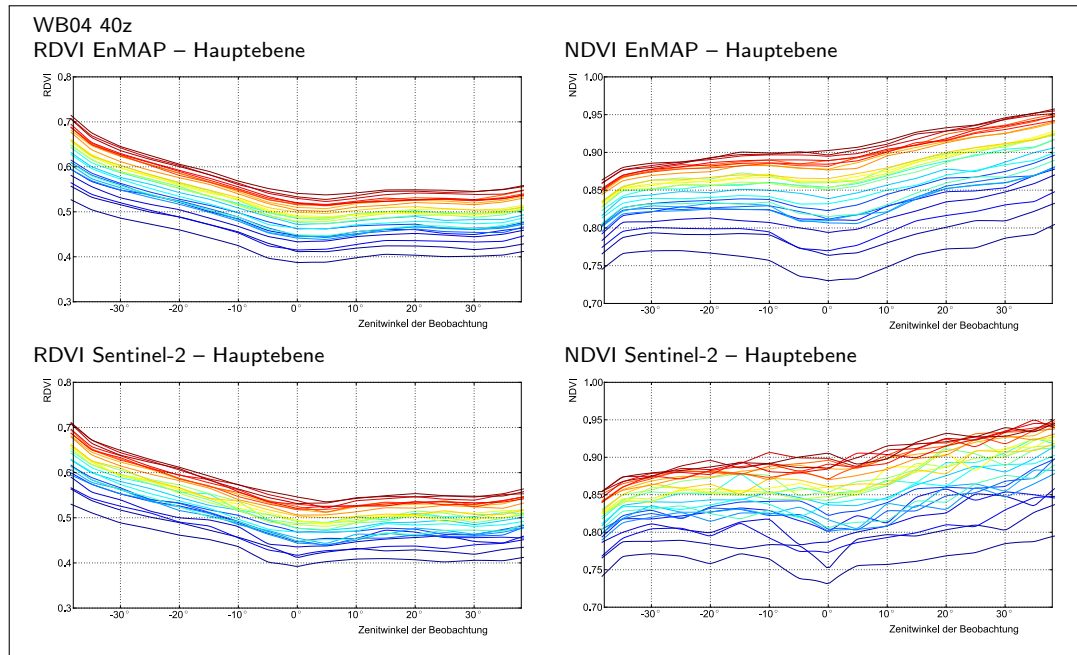


Abb. 6.4 – Querschnitt entlang der Hauptebene der VDF des RDVI und des NDVI für Wintergerstebestände mit mittlerem RA und $RRO = 90^\circ$. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

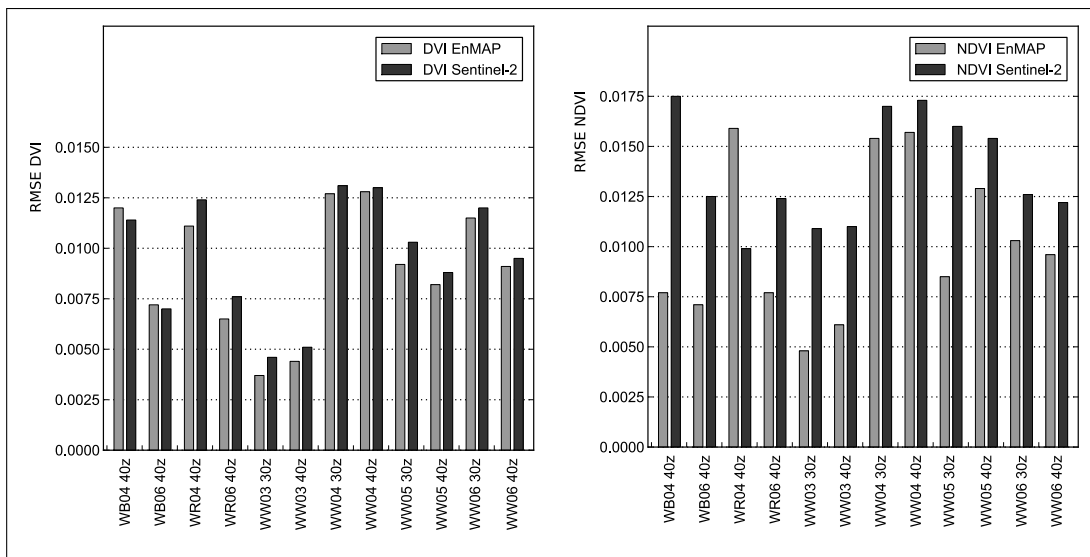


Abb. 6.5 – Vergleich des gemittelten RMSE bei der Polynomflächenapproximation für die VDFs des DVI und des NDVI generiert aus EnMAP- und Sentinel-2-Daten.

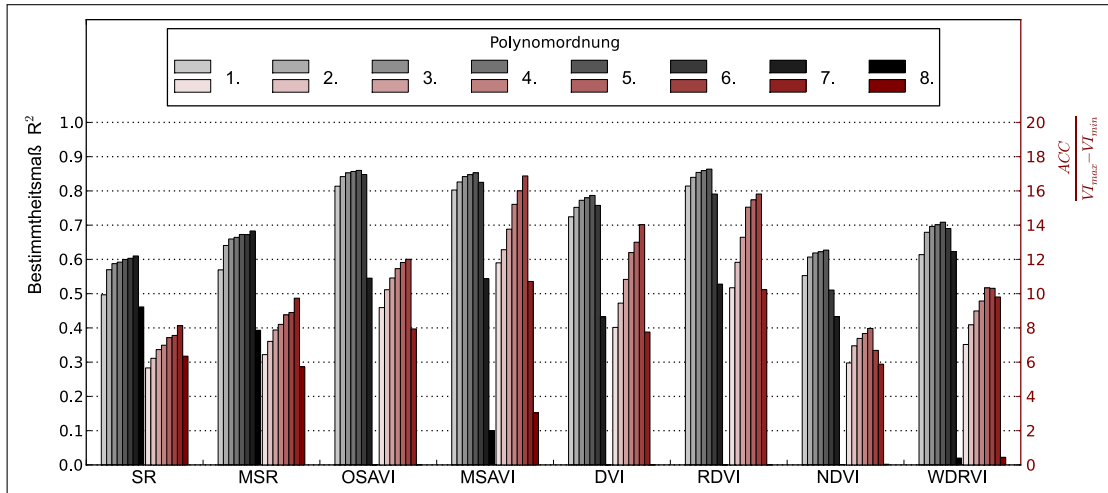


Abb. 6.6 – Vergleich des gemittelten Bestimmtheitsmaßes sowie des Genauigkeitsfaktors normiert mit $VI_{max} - VI_{min}$ für Polynome unterschiedlichem Grads bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation der VIDFs aller untersuchten Vegetationsindizes von WB04 40z.

6.2.3.2 Schrittweise Polynomkurvenapproximation

Drat:

Die Polynomkurvenapproximation wurde für 24 unterschiedliche Azimutrichtungen (von 0° bis 345° , alle 15°) bei jeder VIDF jedes Vegetationsindex und jedes Bestandes durchgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Azimutrichtungen wurden anschließend arithmetisch gemittelt, um einen Vergleich mit den Ergebnissen der Polynomflächenapproximation zu ermöglichen. Hierbei ergaben sich für alle Vegetationsindizes bis auf SR und MSR bei allen untersuchten Fällen bei den Polynomen 5. Ordnung die besten Werte (siehe Abb. 6.6). Bei SR und MSR sind bei bestimmten Fällen mit einem Polynom 7. Grades die höchsten Werte des Bestimmtheitsmaßes erzielt wurden. Die Güte dieser Approximation wurde vom Genauigkeitsfaktor verifiziert, der bei den bestimmten Fällen beim Polynom 7. Grades kleiner war als beim Polynom 5. Grades. In Tab. 6.3 sind die Werte des Bestimmtheitsmaßes für alle Vegetationsindizes aller untersuchten Fälle aufgelistet sowie deren arithmetischer Mittelwert und die Varianz. Auch bei der Polynomkurvenapproximation lassen sich die VIDFs von DVI, MSAVI und RDVI mit einem durchschnittlichen Bestimmtheitsmaß von ca. 80 % am besten approximieren. Nicht so gute Werte zeigten sich wieder bei SR, MSR, WDRVI und NDVI.

Beim direkten Vergleich der beiden Approximationsstrategien muss nun der RMSE betrachtet werden (siehe Tab. 6.4). Der alleinige Vergleich des Bestimmtheitsmaßes hat keine Aussagekraft, da unterschiedliche Modellsituationen (unterschiedliche Approximationsmethode, unterschiedliche Anzahl an Messwerten) vorliegen. Dabei zeigt sich, dass bei der schrittweisen Approximation bei allen Vegetationsindizes außer dem WDRVI ein viel geringerer RMSE vorliegt als bei der flächenhaften Approximation in einem Schritt. Die größte Verbesserung des RMSE ist beim SR und beim NDVI (ca. 50 % niedriger) festzustellen und die geringste hingegen beim OSAVI (ca. 39 %).

Tab. 6.3 – Bestimmtheitsmaß der schrittweisen Polynomkurvenapproximation für alle untersuchten Fälle. Gemittelt aus den Werten der einzelnen Approximationen entlang der Azimutrichtungen.

Fall	SR PO R ²		MSR PO R ²		OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI	Mittelwert
WB04 40z	7	0,610	7	0,683	0,860	0,853	0,787	0,864	0,627	0,709	0,749
WB06 40z	7	0,642	5	0,628	0,745	0,746	0,745	0,750	0,566	0,610	0,679
WR04 40z	7	0,565	5	0,596	0,667	0,643	0,756	0,729	0,526	0,589	0,634
WR06 40z	5	0,567	5	0,581	0,659	0,742	0,762	0,711	0,545	0,569	0,642
WW03 30z	5	0,597	5	0,656	0,728	0,673	0,663	0,698	0,728	0,649	0,674
WW03 40z	5	0,619	5	0,677	0,752	0,704	0,697	0,737	0,741	0,674	0,700
WW04 30z	7	0,639	5	0,786	0,906	0,894	0,850	0,911	0,751	0,863	0,825
WW04 40z	7	0,646	5	0,787	0,895	0,894	0,850	0,907	0,717	0,843	0,817
WW05 30z	7	0,757	7	0,829	0,828	0,895	0,863	0,865	0,600	0,749	0,798
WW05 40z	7	0,729	5	0,780	0,835	0,906	0,886	0,880	0,584	0,729	0,791
WW06 30z	7	0,805	7	0,777	0,769	0,848	0,827	0,818	0,552	0,655	0,756
WW06 40z	7	0,756	7	0,738	0,783	0,863	0,858	0,843	0,557	0,664	0,758
Mittelwert	0,661		0,710		0,786	0,805	0,795	0,809	0,625	0,691	0,735
Varianz	0,0065		0,0070		0,0066	0,0094	0,0051	0,0063	0,0073	0,0085	0,0045

Zwischen den verschiedenen Indizes, den verschiedenen Fällen sowie den verschiedenen Sonnenzenitwinkeln sind auch bei dieser Methode Unterschiede hinsichtlich der Güte der Approximation festzustellen. Anders als bei der Polynomflächenapproximation ist hier die Varianz zwischen den Werten der einzelnen Fälle bei allen Indizes sehr ähnlich. Der Einfluss der Bestandsstrukturmerkmale ist auch bei dieser Methode bei den verschiedenen Fällen sehr variabel. Hingegen ist bei einer relativen Reihenorientierung entlang der Hauptebene kein negativer Einfluss auf die Güte der Approximation feststellbar. Auch die Tendenz, dass die Bestände mit mittlerem Reihenabstand besser approximiert werden können als die mit weitem Reihenabstand, ist bei dieser Methode nicht festzustellen.

Die schrittweise Approximation der VIDF mittels der Polynomkurvenapproximation ermöglicht einen Blick auf die einzelnen Azimutrichtungen. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Güte der Approximation im Bereich der Vorwärtsstreuung vom Bereich der Rückwärtsstreuung unterscheidet, und zwar abhängig vom Vegetationsindex und dem Vegetationsbestand. Beim OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI können die Azimutrichtungen im Bereich der Rückwärtsstreuung der VIDF bei allen Fällen besser approximiert werden als die Richtungen im Bereich der Vorwärtsstreuung. Beim SR und MSR kann bis auf die WW03- und WW04-Fälle im Bereich der Vorwärtsstreuung der VIDF besser approximiert werden und beim NDVI und WDRVI bis auf die WW03-Fälle. Der Sonnenzenitwinkel hat dabei keinen Einfluss.

EnMAP und Sentinel-2:

Wie schon bei den Ergebnissen der Polynomflächenapproximation unterscheidet sich die Art des Polynoms auch hier bei den Sensordaten nicht von der, die sich bei den Drat-Daten als am besten geeignet erwiesen hat. Für 6 der 8 Indizes eignet sich das Polynom 5. Ordnung am besten zur mathematischen Beschreibung der einzelnen Querschnitte der VIDF, außer bei den VIDFs von SR und MSR. Auch hier wurden bei vereinzelt Fällen mit einem Polynom 7. Grades bessere Ergebnisse erzielt. Jedoch traf das bei den Sensordaten beim SR für 8 Fälle zu und beim MSR für 2 Fälle, während es bei den Drat-Daten beim SR 9 Fälle und beim

Tab. 6.4 – Vergleich des RMSE der beiden Approximationsmethoden. Die durchschnittliche Verbesserung gibt an, wieviel Prozent der RMSE der schrittweisen Methode niedriger ist, als bei der flächenhaften Methode.

Polynomflächenapproximation								
Fall	SR	MSR	OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI
WB04 40z	2,3817	0,2390	0,0192	0,0205	0,0146	0,0141	0,0288	0,0531
WB06 40z	0,6249	0,1125	0,0206	0,0221	0,0127	0,0160	0,0213	0,0419
WR04 40z	2,7849	0,2461	0,0174	0,0278	0,0157	0,0146	0,0174	0,0504
WR06 40z	5,2477	0,3584	0,0262	0,0343	0,0182	0,0214	0,0200	0,0689
WW03 30z	0,0586	0,0153	0,0058	0,0065	0,0045	0,0049	0,0102	0,0070
WW03 40z	0,0645	0,0163	0,0063	0,0076	0,0053	0,0055	0,0105	0,0074
WW04 30z	2,6301	0,2525	0,0221	0,0260	0,0179	0,0171	0,0314	0,0507
WW04 40z	3,0946	0,2769	0,0222	0,0258	0,0179	0,0166	0,0318	0,0529
WW05 30z	2,5065	0,2515	0,0279	0,0274	0,0164	0,0207	0,0372	0,0722
WW05 40z	2,8874	0,2768	0,0275	0,0264	0,0147	0,0196	0,0364	0,0755
WW06 30z	0,9749	0,1635	0,0282	0,0328	0,0210	0,0233	0,0306	0,0605
WW06 40z	1,0421	0,1698	0,0277	0,0320	0,0186	0,0220	0,0297	0,0610
schrittweise Polynomkurvenapproximation								
Fall	SR	MSR	OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI
WB04 40z	1,3719	0,1595	0,0147	0,0162	0,0127	0,0106	0,0218	0,0530
WB06 40z	0,4783	0,0868	0,0140	0,0142	0,0086	0,0105	0,0154	0,0420
WR04 40z	1,9959	0,1969	0,0145	0,0237	0,0130	0,0115	0,0134	0,0500
WR06 40z	2,8058	0,2616	0,0162	0,0185	0,0099	0,0124	0,0157	0,0690
WW03 30z	0,0476	0,0122	0,0051	0,0060	0,0041	0,0045	0,0046	0,0070
WW03 40z	0,0542	0,0135	0,0056	0,0068	0,0046	0,0050	0,0049	0,0070
WW04 30z	1,8197	0,1720	0,0153	0,0198	0,0150	0,0118	0,0223	0,0510
WW04 40z	2,0113	0,1816	0,0160	0,0197	0,0151	0,0116	0,0235	0,0530
WW05 30z	1,5838	0,1593	0,0185	0,0158	0,0103	0,0126	0,0265	0,0720
WW05 40z	1,7577	0,1775	0,0189	0,0154	0,0093	0,0122	0,0265	0,0760
WW06 30z	0,6491	0,1124	0,0187	0,0186	0,0125	0,0141	0,0218	0,0610
WW06 40z	0,6945	0,1175	0,0186	0,0182	0,0107	0,0132	0,0212	0,0610
durchschnittliche Verbesserung	49,5 %	40,9 %	38,7 %	47,0 %	40,8 %	45,7 %	49,8 %	0,4 %

MSR 4 Fälle waren (siehe Tab. 6.3).

Beim direkten Vergleich der beiden Approximationsmethoden zeigt sich auch bei den Sensordaten, dass bei der schrittweisen Approximation ein allgemein geringerer RMSE auftritt als bei der flächenhaften Approximation. Der Grad der Verbesserung ist dabei ähnlich wie bei den Drat-Daten.

Der Vergleich der Sensordaten mit den Drat-Daten zeigt erneut den Unterschied zwischen den EnMAP-Daten und den Sentinel-2-Daten. Während die Ergebnisse der EnMAP-Daten wieder sehr ähnliche Werte aufzeigen wie die Ergebnisse der Drat-Daten, zeigen sich bei den Sentinel-2-Daten bei der Gruppe der für Rauschen sensitiven Vegetationsindizes deutlich niedrigere Werte des Bestimmtheitsmaßes. Die für Rauschen robusten Vegetationsindizes zeigen bei den EnMAP-Daten ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von ca. 80 % und bei den Sentinel-2-Daten nur einen gering niedrigeren von ca. 76 %. Die bei den Drat-Daten festgestellten Unterschiede für die Güte der Approximation zwischen den verschiedenen Indizes, den verschiedenen Fällen, den verschiedenen Sonnenzenitwinkeln sowie den Einflüssen der

Bestandsstrukturmerkmale sind in ähnlicher Weise auch in den simulierten Sensordaten festzustellen. Die Unterschiede zwischen dem Bereich der Vorwärts- und der Rückwärtsstreuung zeigen sich ebenfalls in ähnlicher Weise in den Sensordaten.

6.2.3.3 Fazit

Die VIDFs der untersuchten Vegetationsindizes lassen sich insgesamt mit beiden Approximationsmethoden mathematisch gut beschreiben. Dabei ist bei beiden Methoden eine Gruppenbildung zu beobachten. Die VIDFs von OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI lassen sich mit Polynomen beider Methoden sehr gut approximieren, während die VIDFs von SR, MSR, NDVI und WDRVI gut bis eher mäßig approximiert werden können. Genau diese Gruppenbildung ist auch schon im vorherigen Kapitel bei der Untersuchung der VIDFs der verschiedenen Vegetationsindizes hinsichtlich der Einflüsse von Bestandsstrukturmerkmalen beobachtet worden. Dabei haben sich MSAVI, DVI und RDVI als sehr robust gegenüber den Einflüssen von Bestandsstrukturmerkmalen herausgestellt, welches sich nun bei der Approximation widerspiegelt. Weniger Einflüsse bedeuten eine gleichmäßigere VIDF-Struktur, die wiederum besser approximiert werden kann.

Insgesamt wurden für alle Vegetationsindizes aus den Drat-Daten bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation bessere Ergebnisse als bei der Polynomflächenapproximation erzielt, weil dabei die lokalen Gegebenheiten der VIDF besser berücksichtigt werden können. Die Verbesserung der Werte liegt zwischen 35 % und 45 %, wobei sich beim SR mit bis zu 70 % und beim MSR mit bis zu 80 % eine deutlich stärkere Verbesserung ergibt und beim NDVI mit unter 30% eine deutlich geringere. Bei den EnMAP-Daten sowie bei den Sentinel-2-Daten sind sehr ähnliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden festzustellen. Die Unterschiede in den Ergebnissen sind sensorunabhängig und somit auf die unterschiedlichen Methoden zurückzuführen.

Beim direkten Vergleich der Drat-Daten mit den Sensordaten zeigte sich, dass die EnMAP-Daten die Approximationsergebnisse der Drat-Daten sehr ähnlich abbilden, während das bei den Sentinel-2-Daten nur für 4 der 8 Vegetationsindizes (OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI) der Fall ist. Die Ergebnisse der anderen 4 Indizes (SR, MSR, NDVI und WDRVI) lieferten eine kaum vergleichbare Güte der Approximation. Dabei stellte sich heraus, dass OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI robust gegenüber rauschintensiven Daten sind im Gegensatz zu SR, MSR, NDVI und WDRVI.

6.2.4 Bestimmung der Transformationsfunktion

Zur Bestimmung der Transformationsfunktion wird basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen in Kap. 5 angenommen, dass die VIDFs eines Vegetationsindex eine Isoflächenschar darstellen, deren Werteunterschiede aus einer linearen Verschiebung entlang der Kote hervor gehen. Diese Annahme ermöglicht eine Regression über alle VIDFs eines Vegetationsindex ohne Berücksichtigung des absoluten Gliedes. Obwohl im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, dass die Approximation der einzelnen VIDFs mit der schrittweisen Methode bessere Ergebnisse liefert, wird die Bestimmung der Transformationsfunktion für beide Methoden durchgeführt. Denn der Vorteil der flächenhaften Methode gegenüber der schrittweisen Methode ist, dass nur eine Funktion ermittelt werden muss, um alle gewünschten

Beobachtungspositionen einbeziehen zu können. Da die Genauigkeit der Transformationsfunktion nicht nur von der Approximationsgenauigkeit bestimmt wird, sondern auch von der zuvor aufgestellten Annahme, ist eine vergleichende Untersuchung beider Methoden durchaus sinnvoll. Für die Polynomflächenapproximation ergibt sich nun die Suche nach folgendem funktionalen Zusammenhang:

$$VI(x, y) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L (a_{kl} \cdot x^k \cdot y^l) + b, \quad \text{mit } (K \cdot L) + 3 \leq N \quad \begin{cases} l = 0 & \text{wenn } k = K, \\ k = 0 & \text{wenn } l = L, \\ l > 0 & \text{wenn } k = 0, \\ k > 0 & \text{wenn } l = 0, \end{cases} \quad (6.8)$$

so dass folgende notwendige Bedingung erfüllt ist:

$$F(a_{kl} : k = 0 \dots K, l = 0 \dots L) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L (a_{kl} \cdot x_i^k \cdot y_i^l) + b_i - VI_i \right)^2 \rightarrow \min_{a_{kl} : k=0 \dots K, l=0 \dots L, b_i : i=1 \dots N} \quad (6.9)$$

Bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation wird nach einem funktionalen Zusammenhang in Form von

$$VI_\phi(\theta) = a_M \cdot \theta^M + a_{M-1} \cdot \theta^{M-1} + \dots + a_1 \cdot \theta + b, \quad \text{mit } M \leq N - 1 \quad (6.10)$$

gesucht, so dass folgende notwendige Bedingung

$$F(a_1, \dots, a_M, b) = \sum_{i=1}^N (a_M \cdot \theta_i^M + \dots + a_1 \cdot \theta_i + b_i - VI_i)^2 \rightarrow \min_{a_1, \dots, a_M, b_i : i=1 \dots N} \quad (6.11)$$

erfüllt ist. Daraus ergibt sich die Transformationsfunktion F_T für die Polynomflächenapproximation zu

$$F_T = VI(0^\circ, 0^\circ) = VI(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi)) - \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L (a_{kl} \cdot x(\theta, \phi)^k \cdot y(\theta, \phi)^l), \quad \begin{cases} l = 0 & \text{wenn } k = K, \\ k = 0 & \text{wenn } l = L, \\ l > 0 & \text{wenn } k = 0, \\ k > 0 & \text{wenn } l = 0, \end{cases} \quad (6.12)$$

mit $(K \cdot L) + 3 \leq N$

und für die Polynomkurvenapproximation $F_{A,\phi}$ zu

$$F_{T,\phi} = VI_\phi(0^\circ) = VI_\phi(\theta) - (a_M \cdot \theta^M + a_{M-1} \cdot \theta^{M-1} + \dots + a_1 \cdot \theta) \quad (6.13)$$

6.2.5 Ergebnisse der Nadirwertbestimmung

Für alle 8 Vegetationsindizes und jeden definierten Fall wurden die Transformationsfunktionen beider Methoden bestimmt. Dabei wurde jeweils das bei der Approximation als bestes

festgestellte Polynom verwendet. Die jeweils 224 VIDFs eines Falles müssen für eine realistische Abschätzung der Genauigkeit in 2 Gruppen unterteilt werden, einer Regressionsgruppe und einer Validationsgruppe. Um eine repräsentative Menge an VIDFs in der Regressionsgruppe zu gewährleisten, wurde die Methode der Kreuzvalidierung verwendet. Diese wurde mit je 5 Partitionen und 10-facher Repartitionierung durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nadirwertbestimmung vorgestellt.

6.2.5.1 Nadirwertbestimmung mit Hilfe der Polynomflächenapproximation

Tab. 6.5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der Polynomflächenapproximation für die Drat- und die Sensordaten. Es zeigen sich überwiegend gute ($0,95 > R^2 \geq 0,85$) und sehr gute Werte ($R^2 > 0,95$) für das Bestimmtheitsmaß zwischen vorhergesagtem und gemessenem Nadirwert des jeweiligen Indexes. Bei den Drat-Daten sind das 57 der 96 Fälle, bei den EnMAP-Daten auch 57 und bei den Sentinel-2-Daten 50 Fälle. Darunter ist der WW03 40z Fall, bei denen die VIDF aller untersuchten Indizes bei allen drei Datengruppen sehr gut korrigiert werden können. Bei den Fällen im Wachstumsstadium 4 zeigen sich bei allen Fällen neben wenigen Ausnahmen ebenfalls gute und sehr gute Ergebnisse. Nur bei wenigen der 96 Fälle (19 bei den Drat-Daten, 13 bei den EnMAP-Daten und 19 bei den Sentinel-2-Daten) sind die Ergebnisse nicht zufrieden stellend ($R^2 < 0,7$). Darunter der Fall WR06 40z, bei dem bei allen untersuchten Daten mit keinem der 8 Vegetationsindizes eine erfolgreiche Korrektur möglich ist. Auch der Fall WB06 40z fällt auf. Hier ist bei den Sentinel-2-Daten mit keinem der 8 untersuchten Indizes eine erfolgreiche Korrektur möglich und bei den Drat- und EnMAP-Daten zeigen sich teils nur mäßige Werte. Beim Blick auf die Indizes fällt der SR auf, bei dem die VIDF von 4 der 12 Fällen bei den Drat-Daten, von 3 bei den EnMAP-Daten und bei den Sentinel-2-Daten sogar von 7 Fälle nicht korrigiert werden können. Bei allen anderen Indizes verlief die Korrektur bei allen Datengruppen insgesamt sehr erfolgreich, wobei beim MSR und DVI etwas weniger gute Ergebnisse erzielt wurden.

Der direkte Vergleich zwischen den tatsächlichen Vegetationsindizes der Schrägblicke und den vorhergesagten (korrigierten) Nadirwerten jeweils in Bezug auf die gemessenen Nadirwerte zeigt bei allen drei Datengruppen eine enorme Verbesserung. Die Verbesserungen bei den Sentinel-2-Daten sind jedoch insgesamt etwas geringer als bei den Drat- und den EnMAP-Daten. Der RMSE hat sich bei den vorhergesagten Nadirwerten gegenüber den tatsächlichen Werten der Schrägblicke halbiert und bei MSAVI, DVI und RDVI sogar mehr als gedrittelt. Bei einzelnen Fällen bei den drei Vegetationsindizes treten sogar Werte auf, die kleiner als ein Viertel des RMSE der tatsächlichen Werte sind. Auch bei den Fällen, wo das Bestimmtheitsmaß zu niedrig ist, um eine erfolgreiche Korrektur anzunehmen, ist der RMSE der vorhergesagten Nadirwerte deutlich niedriger als bei den tatsächlichen Werten. Bei diesen Fällen kann also die Transformationsfunktion durchaus genutzt werden, jedoch ist die geringere Genauigkeit, infolge von Abweichungen von bis zu 30 % vom realen Nadirwert, zu beachten.

Der Blick auf den Einfluss der Bestandstrukturmerkmale bei den Drat-Daten zeigt eine deutliche Verringerung des RMSE, wenn die Transformationsfunktion nur mit Beständen bestimmter Merkmale ermittelt wird. In 79 % der untersuchten Fälle ist eine Verbesserung gegenüber der Nadirwertbestimmung unter Verwendung aller Bestände festzustellen. Ohne die Bestände mit weitem Reihenabstand sind es 86 % und zusätzlich ohne die WW03-Bestände sogar 90 %.

Tab. 6.5 – Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der Polynomflächenapproximation. Bewertet wurde das Bestimmtheitsmaß zwischen vorhergesagtem Nadirwert und gemessenen Nadirwert des jeweiligen Indexes für alle drei Datengruppen: **Drat**; **EnMAP**; **Sentinel-2**; ++ wenn $R^2 \geq 0,95$; + wenn $0,95 > R^2 \geq 0,85$; * wenn $0,85 > R^2 \geq 0,7$ und – wenn $R^2 < 0,7$.

Fall	SR			MSR			OSAVI			MSAVI		
	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2
WB04 40z	*	–	–	+	+	*	++	++	+	++	+	+
WB06 40z	+	+	–	+	+	–	*	*	–	–	–	–
WR04 40z	+	+	*	+	+	*	+	+	+	+	+	+
WR06 40z	–	–	++	–	–	++	–	–	–	–	–	–
WW03 30z	++	++	+	++	++	+	++	++	+	++	++	*
WW03 40z	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+
WW04 30z	–	–	–	+	*	*	+	+	+	+	*	+
WW04 40z	–	–	–	+	+	*	+	+	+	+	+	+
WW05 30z	–	+	–	*	+	*	*	*	+	*	*	+
WW05 40z	*	*	–	+	+	*	+	+	+	+	+	+
WW06 30z	*	+	*	*	+	*	–	*	*	–	*	*
WW06 40z	+	+	*	+	+	*	*	*	*	*	*	*

Fall	DVI			RDVI			NDVI			WDRVI		
	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2
WB04 40z	+	+	+	++	++	++	+	+	+	+	+	+
WB06 40z	–	–	–	*	*	–	*	*	–	+	*	–
WR04 40z	++	++	++	++	++	++	+	+	+	+	+	+
WR06 40z	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
WW03 30z	++	++	*	++	++	+	++	++	+	++	++	+
WW03 40z	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++
WW04 30z	+	*	+	++	+	+	+	*	+	++	+	+
WW04 40z	+	+	+	++	++	+	+	+	+	++	++	+
WW05 30z	–	*	+	*	*	+	*	*	*	*	*	+
WW05 40z	+	+	+	+	+	+	*	*	*	+	+	+
WW06 30z	–	*	*	–	*	*	–	*	*	*	+	*
WW06 40z	*	*	*	*	*	*	*	*	*	+	+	*

Bei 44 der 96 untersuchten Fälle ergab die Bestimmung der Transformationsfunktion nur mit Beständen mit weitem Reihenabstand schlechtere Ergebnisse. Bei den WW03-Fällen ergab die Nadirwertbestimmung unter Verwendung der Bestände mit mittlerem Reihenabstand bei 6 der 8 Indizes (außer MSAVI und DVI) ungenauere Werte als bei den Beständen mit weitem Reihenabstand. Darüber hinaus sind zwischen den Indizes keine gravierenden Unterschiede festzustellen. Beim MSR zeigen sich bei 85 % der Fälle die meisten Verbesserungen, während es beim RDVI mit nur 71 % die wenigsten Fälle mit Verbesserungen gibt. Bei den Sensordaten sind ähnliche Beobachtungen festzustellen, jedoch sind die Fälle der Verbesserung geringer als bei den Drat-Daten. Bei den EnMAP-Daten ergibt sich eine allgemeine Verbesserung von 76 %. Ohne die Bestände mit weitem Reihenabstand sind es 83 % und zusätzlich ohne die WW03-Bestände 88 %. Bei den Indizes zeigen sich die meisten Verbesserungen beim MSR mit 82 % der Fälle und die wenigsten beim NDVI mit 71 %. Bei den Sentinel-2-Daten ergibt sich eine allgemeine Verbesserung von 72 %. Ohne die Bestände mit weitem Reihenabstand sind es 80 % und zusätzlich ohne die WW03-Bestände 86 %. Bei den Indizes zeigen sich die meisten Verbesserungen beim WDRVI mit 80 % der Fälle und die wenigsten beim NDVI mit 58 %.

Tab. 6.6 – Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der schrittweisen Polynomkurvenapproximation. Bewertet wurde das Bestimmtheitsmaß zwischen vorhergesagtem Nadirwert und gemessenen Nadirwert des jeweiligen Indexes für alle drei Datengruppen: **Drat**; **EnMAP**; **Sentinel-2**; ++ wenn $R^2 \geq 0,95$; + wenn $0,95 > R^2 \geq 0,85$; * wenn $0,85 > R^2 \geq 0,7$ und – wenn $R^2 < 0,7$.

Fall	SR			MSR			OSAVI			MSAVI		
	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2
WB04 40z	*	*	*	+	+	+	++	++	++	++	++	++
WB06 40z	+	+	*	+	+	*	+	+	+	*	*	*
WR04 40z	+	+	*	+	+	+	++	+	+	++	+	+
WR06 40z	–	–	++	–	–	++	*	*	*	*	*	*
WW03 30z	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	+
WW03 40z	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	++
WW04 30z	*	*	*	+	+	+	++	++	++	+	+	+
WW04 40z	*	*	*	+	+	+	++	++	++	++	++	++
WW05 30z	+	+	*	++	+	+	++	+	+	++	+	++
WW05 40z	+	+	*	++	++	+	+	+	+	++	++	++
WW06 30z	++	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
WW06 40z	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fall	DVI			RDVI			NDVI			WDRVI		
	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2	D	E	S2
WB04 40z	+	+	+	++	++	++	+	+	+	++	++	+
WB06 40z	*	*	*	+	+	+	+	+	*	+	+	*
WR04 40z	++	++	++	++	++	++	+	+	+	+	+	+
WR06 40z	*	*	*	*	*	*	*	*	–	*	*	–
WW03 30z	++	+	+	++	++	+	++	++	++	++	++	++
WW03 40z	+	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++
WW04 30z	+	+	+	++	++	++	+	+	+	++	++	+
WW04 40z	+	+	+	++	++	++	+	+	+	++	++	++
WW05 30z	+	+	+	++	+	++	+	+	+	++	+	+
WW05 40z	+	+	+	++	++	+	+	+	+	+	+	+
WW06 30z	+	+	+	+	+	+	+	+	*	+	+	+
WW06 40z	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

6.2.5.2 Nadirwertbestimmung mit Hilfe der schrittweisen Polynomkurvenapproximation

Tab. 6.6 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Nadirwertbestimmung mittels der schrittweisen Polynomkurvenapproximation für die Drat- und die Sensordaten. Es zeigen sich überwiegend sehr gute ($R^2 \geq 0,95$) und gute Werte ($0,95 > R^2 \geq 0,85$) für das Bestimmtheitsmaß zwischen vorhergesagtem und gemessenem Nadirwert des jeweiligen Indexes. Bei den Drat-Daten sind das 83 der 96 Fälle, bei den EnMAP-Daten auch 83 und bei den Sentinel-2-Daten 77 Fälle. Nur bei sehr wenigen Fällen (jeweils bei 2 Fällen bei allen Daten-Gruppen) sind die Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Selbst die Ergebnisse des bei der Polynomflächenapproximation festgestellten schwierigen Falles WR06 40z konnten bei den Drat- und EnMAP-Daten für 7 Indizes (alle außer SR und MSR) und bei den Sentinel-2-Daten für die 7 andere Indizes (alle außer NDVI und WDRVI) zufriedenstellend ($R^2 > 0,7$) korrigiert werden. Insgesamt verlief die Korrektur bei allen drei Datengruppen sehr erfolgreich.

Der direkte Vergleich zwischen den tatsächlichen Vegetationsindizes der Schrägblicke und den vorhergesagten (korrigierten) Nadirwerten jeweils in Bezug auf die gemessenen Nadirwerte zeigt auch hier bei allen drei Datengruppen eine enorme Verbesserung. Die Verbesserungen bei den Sentinel-2-Daten sind jedoch insgesamt etwas geringer als bei den Drat-

und den EnMAP-Daten. Der RMSE hat sich bei den vorhergesagten Nadirwerten gegenüber den tatsächlichen Werten der Schrägblicke mehr als halbiert und bei MSAVI, DVI und RDVI sogar mehr als geviertelt. Bei einzelnen Fällen bei den drei Vegetationsindizes treten sogar Werte auf, die kleiner als ein Sechstel des RMSE der tatsächlichen Werte sind. Auch bei den wenigen Fällen, wo das Bestimmtheitsmaß zu niedrig ist, um eine erfolgreiche Korrektur anzunehmen, ist der RMSE der vorhergesagten Nadirwerte deutlich niedriger als bei den tatsächlichen Werten. Bei diesen Fällen kann also die Transformationsfunktion durchaus genutzt werden, jedoch ist die geringere Genauigkeit, Abweichungen von bis zu 20 % vom realen Nadirwert, zu beachten.

Der Blick auf den Einfluss der Bestandstrukturmerkmale bei den Drat-Daten zeigt auch bei dieser Approximationsmethode eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit, wenn die Transformationsfunktion nur mit Beständen bestimmter Merkmale ermittelt wird. In 85 % der untersuchten Fälle ist eine Verbesserung gegenüber der Nadirwertbestimmung unter Verwendung aller Bestände festzustellen. Im Gegensatz zur Polynomflächenapproximation sind bei dieser Methode keine eindeutigen Tendenzen bei der Nadirwertbestimmung mit bestimmten Bestandsmerkmalen festzustellen. Jedoch fallen die WW04-Fälle auf, da bei über 90 % der Fälle Verbesserungen festzustellen sind. Bei den Indizes sind auch bei dieser Methode keine gravierenden Unterschiede festzustellen. Beim MSR zeigen sich bei 90 % der Fälle die meisten Verbesserungen, während es beim RDVI mit nur 78 % die wenigsten Fälle mit Verbesserungen gibt. Bei den Sensordaten sind ähnliche Beobachtungen festzustellen, wobei sich die Werte der EnMAP-Daten mit denen der Drat-Daten gleichen, während die Fälle der Verbesserung bei den Sentinel-2-Daten geringer sind. Bei den EnMAP-Daten zeigt sich eine allgemeine Verbesserung von 85 % und beim Blick auf die Indizes zeigen sich die meisten Verbesserungen beim DVI mit 90 % der Fälle und die wenigsten beim OSAVI und RDVI mit 79 %. Bei den Sentinel-2-Daten ergibt sich eine allgemeine Verbesserung von 79 % und bei den Indizes zeigen sich die meisten Verbesserungen beim DVI mit 86 % der Fälle und die wenigsten beim SR mit 71 %.

Bei den einzelnen Azimutrichtungen sind im Gegensatz zur Approximation jeweils untereinander nur sehr geringe Unterschiede festzustellen. Bei welchem Bereich, dem der Vorwärts- oder der Rückwärtsstreuung, dabei bessere Ergebnisse erzielt wurden, hängt beim SR, MSR, OSAVI, MSAVI und DVI scheinbar von der Stärke der Volumenstreuung ab. Bei den Fällen mit wenig oder keiner Volumenstreuung (z.B. WW03-Fälle und WB06 40z) zeigten sich beim SR und MSR größtenteils im Bereich der Vorwärtsstreuung etwas besser Ergebnisse und vice versa bei OSAVI, MSAVI und DVI im Bereich der Rückwärtsstreuung. Beim NDVI und WDRVI sind wie schon bei der Approximation außer bei den WW03-Fällen im Bereich der Vorwärtsstreuung bessere Ergebnisse festgestellt worden. Deren Unterschied ist hingegen nur sehr gering.

6.2.5.3 Fazit

Die Bestimmung des Nadirwertes aus Schrägblickbeobachtungen ist mit beiden Approximationsmethoden bei allen untersuchten Vegetationsindizes außer dem SR gut möglich. Hier setzt sich die Beobachtung beim Vergleich der beiden Approximationsmethoden fort. Der RMSE der Nadirwertbestimmung zeigt deutlich bessere Werte bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation. Tab. 6.7 zeigt wieviel geringer der RMSE der schrittweisen Poly-

Tab. 6.7 – Verbesserung des RMSE der Nadirwertbestimmung der schrittweisen Polynomkurvenapproximation gegenüber der Polynomflächenapproximation. Die Werte zeigen wieviel geringer der RMSE bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation ist.

Fall	SR	MSR	OSAVI	MSAVI	DVI	RDVI	NDVI	WDRVI	Mittelwert
WB04 40z	73,6 %	49,8 %	29,3 %	29,6 %	18,1 %	32,1 %	33,0 %	25,6 %	36,4 %
WB06 40z	30,7 %	30,2 %	50,0 %	54,9 %	51,2 %	52,4 %	36,4 %	28,4 %	41,8 %
WR04 40z	39,5 %	24,9 %	17,2 %	18,1 %	23,1 %	30,4 %	26,9 %	17,9 %	24,8 %
WR06 40z	83,3 %	36,9 %	60,5 %	83,8 %	81,8 %	77,4 %	27,4 %	21,5 %	59,1 %
WW03 30z	23,9 %	23,0 %	17,6 %	16,7 %	22,0 %	11,1 %	117,4 %	27,3 %	32,4 %
WW03 40z	19,9 %	18,5 %	7,1 %	17,6 %	8,7 %	20,0 %	124,5 %	14,8 %	28,9 %
WW04 30z	44,5 %	47,1 %	43,8 %	31,3 %	20,0 %	44,1 %	39,0 %	45,3 %	39,4 %
WW04 40z	53,9 %	52,5 %	37,5 %	32,0 %	19,2 %	46,6 %	36,2 %	38,7 %	39,6 %
WW05 30z	58,3 %	58,2 %	51,4 %	70,9 %	55,3 %	66,7 %	39,6 %	42,0 %	55,3 %
WW05 40z	64,2 %	56,1 %	48,1 %	68,8 %	61,3 %	63,9 %	35,8 %	38,7 %	54,6 %
WW06 30z	50,2 %	45,9 %	49,7 %	77,4 %	68,0 %	63,1 %	42,2 %	38,0 %	54,3 %
WW06 40z	50,0 %	44,7 %	50,5 %	75,8 %	77,6 %	66,7 %	41,5 %	35,9 %	55,3 %
Mittelwert	49,4%	40,6%	38,6%	48,1%	42,2%	47,9%	50,0%	31,2%	43,5%

nomkurvenapproximation gegenüber der Polynomflächenapproximation ist. Die schrittweise Polynomkurvenapproximation lieferte dabei durchschnittlich ca. 40 % bessere Ergebnisse als die Polynomflächenapproximation und ohne Einbeziehung der WW03-Fälle sogar mehr als 50 %. Durch die schrittweise Vorgehensweise können die lokalen Gegebenheiten der VIDF bedingt durch die Strukturmerkmale besser berücksichtigt werden als bei der Polynomflächenapproximation.

Die bei der Approximation festgestellte Gruppenbildung der Indizes konnte bei der Bestimmung der Nadirwerte bei der Polynomflächenapproximation nicht bestätigt werden und bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation zeigte sich die Gruppenbildung lediglich in den Sentinel-2-Daten. Bei der Bestimmung der Nadirwerte hat sich die Gruppierung verschoben. Zu den besten Indizes zählt nun der WDRVI, im Gegensatz zum DVI. Der Grund liegt in der Annahme, auf der die entwickelte Nadirwertbestimmung basiert: Die VIDFs eines Vegetationsindex beschreiben eine Isoflächenschar, deren Wertunterschiede aus einer linearen Verschiebung entlang der Kote hervor gehen (siehe Abschn. 6.2.4). Diese trifft jedoch bei den untersuchten Fällen und untersuchten Indizes nie vollkommen zu. Entscheidend ist dabei die Stärke der Abweichung von dieser Annahme. Je stärker die VIDFs von dieser Annahme abweichen, desto geringer ist in diesem Fall die Genauigkeit. Neben der Güte der Approximation hängt die Genauigkeit der Nadirwertbestimmung demnach auch davon ab, in wie weit die definierte Annahme zutrifft. Der enorm geringere RMSE der geschätzten Nadirwerte gegenüber dem RMSE zwischen den tatsächlichen Werten der Vegetationsindizes der Schrägblicke und den realen Nadirwerten verdeutlicht sowohl die Wichtigkeit als auch die Güte der Transformationsfunktion, deren Genauigkeit durch die Bestimmung nur mittels Schrägblickbeobachtungen von Beständen mit bestimmten Bestandsstrukturmerkmalen (z.B. nur eine bestimmte relative Reihenorientierung) sogar noch gesteigert werden konnte.

6.3 Anwendung der Transformationsfunktion zur Bestimmung des Blattflächenindex

Die Bestimmung des Blattflächenindex erfolgt mit einer empirischen Beziehung zwischen LAI und Vegetationsindex (Baret und Guyot, 1991; Haboudane et al., 2004). Dabei wird der jeweilige Index mit den LAI-Werte der verschiedenen Bestände eines Falles unter Nutzung eines Regressionsmodells mit einem Polynom erster Ordnung korreliert. Aufgebaut wird die Beziehung mittels der gemessenen Nadirwerte der Vegetationsindizes um ein von den Schrägblicken unabhängiges Modell zu definieren. Anschließend wird das Regressionsmodell zusammen mit der Transformationsfunktion genutzt, um aus den Schrägblickaufnahmen den Blattflächenindex zu schätzen. Auch diese Untersuchungen wurden mit der Methode der Kreuzvalidierung unter Nutzung von 5 Partitionen und 10-facher Repartitionierung durchgeführt.

Mittels der Polynomflächenapproximation kann der LAI aus Schrägblickbeobachtungen wie folgt bestimmt werden:

$$LAI = c_2 \cdot F_A(\theta, \phi)^2 + c_1 \cdot F_A(\theta, \phi) + d \quad (6.14)$$

und mittels der schrittweisen Polynomkurvenapproximation ergibt sich folgende Beziehung:

$$LAI = c_2 \cdot F_{A,\phi}(\theta)^2 + c_1 \cdot F_{A,\phi}(\theta) + d \quad (6.15)$$

Die Schätzung des LAI wurde beispielhaft für den NDVI und WDRVI durchgeführt. Zwei Indizes, die auch in der Literatur häufig mit dem LAI korreliert werden (z.B. Lee et al., 2004; Gitelson, 2004; Hancock und Dougherty, 2007; Hatfield et al., 2008). Zudem ist der NDVI laut Lee et al. (2004) auch der meist genutzte Index zur Schätzung des LAI. Zum Vergleich wurden die Transformationsfunktionen beider entwickelter Methoden genutzt.

6.3.1 Ergebnisse

In Tab. 6.8 sind die Ergebnisse der Schätzung des LAI für die unveränderten Werte der Schrägblickbeobachtung zusammen mit den Ergebnissen unter Nutzung der Transformationsfunktion mit beiden entwickelten Methoden dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für fast alle untersuchten Fälle mit beiden Transformationsmethoden niedrigere Fehler als für die Schätzung mit den unveränderten Vegetationsindizes der Schrägblickbeobachtungen. Die Ausnahmen sind vier Fälle der schrittweisen Methode, drei bei der Schätzung mittels des NDVI aus den Drat-Daten und einer bei der Schätzung mittels des NDVI bei den EnMAP-Daten (siehe graue Flächen in Tab. 6.8). Für diese Fälle ist der RMSE geringfügig höher als bei der Schätzung des LAI mit den unveränderten Schrägblickbeobachtungen.

Insgesamt sind die Verbesserungen der Schätzung unter Nutzung des WDRVI mit beiden Methoden deutlich besser als unter Nutzung des NDVI. Beim Vergleich beider Methoden miteinander sind die Verbesserungen der LAI-Schätzung bei der schrittweisen Methode für den WDRVI bei den Drat- und EnMAP-Daten annähernd gleich, bei den Sentinel-2-Daten hingegen zeigt die schrittweise Methode größere Verbesserungen. Beim NDVI sind die Verbesserungen bei der flächenhaften Methode für die Drat- und EnMAP-Daten etwas höher und bei den Sentinel-2-Daten bei der schrittweisen Methode.

Tab. 6.8 – Ergebnisse der Schätzung des Blattflächenindex. Dargestellt ist jeweils der mittlere RMSE in der Einheit des LAI. Die grauen Flächen markieren die Fälle, bei denen keine Verbesserung mit der Nadirwertableitung erzielt wurde, sondern sogar eine geringe Verschlechterung.

Originaldaten der Schrägblickbeobachtung						
Fall	NDVI Drat	WDRVI	NDVI EnMAP	WDRVI	NDVI Sentinel-2	WDRVI
WB04 40z	0,257	0,254	0,256	0,254	0,265	0,266
WB06 40z	0,426	0,428	0,427	0,429	0,457	0,458
WR04 40z	0,423	0,393	0,381	0,370	0,400	0,398
WR06 40z	0,745	0,744	0,721	0,721	1,303	1,304
WW03 30z	0,032	0,032	0,033	0,032	0,035	0,035
WW03 40z	0,038	0,039	0,035	0,035	0,037	0,037
WW04 30z	0,200	0,189	0,222	0,203	0,205	0,197
WW04 40z	0,204	0,192	0,204	0,193	0,211	0,204
WW05 30z	0,266	0,242	0,329	0,321	0,278	0,268
WW05 40z	0,276	0,258	0,276	0,259	0,294	0,286
WW06 30z	0,277	0,265	0,280	0,266	0,327	0,316
WW06 40z	0,297	0,288	0,298	0,288	0,321	0,319
Polynomflächenapproximation						
Fall	NDVI Drat	WDRVI	NDVI EnMAP	WDRVI	NDVI Sentinel-2	WDRVI
WB04 40z	0,226	0,192	0,227	0,192	0,233	0,210
WB06 40z	0,366	0,341	0,341	0,318	0,403	0,402
WR04 40z	0,340	0,285	0,340	0,289	0,356	0,325
WR06 40z	0,662	0,668	0,663	0,670	0,719	0,722
WW03 30z	0,025	0,026	0,025	0,026	0,029	0,030
WW03 40z	0,025	0,027	0,026	0,027	0,030	0,030
WW04 30z	0,186	0,160	0,185	0,161	0,191	0,171
WW04 40z	0,195	0,163	0,194	0,164	0,201	0,178
WW05 30z	0,260	0,209	0,309	0,277	0,272	0,242
WW05 40z	0,271	0,218	0,270	0,220	0,282	0,251
WW06 30z	0,272	0,234	0,273	0,237	0,292	0,269
WW06 40z	0,283	0,245	0,282	0,246	0,303	0,284
durchschnittliche Verbesserung	14,4 %	23,2 %	14,2 %	22,3 %	17,2 %	22,4 %
Schrittweise Polynomkurvenapproximation						
Fall	NDVI Drat	WDRVI	NDVI EnMAP	WDRVI	NDVI Sentinel-2	WDRVI
WB04 40z	0,235	0,196	0,236	0,196	0,242	0,209
WB06 40z	0,350	0,327	0,353	0,331	0,389	0,380
WR04 40z	0,355	0,305	0,356	0,306	0,371	0,330
WR06 40z	0,650	0,649	0,650	0,648	0,683	0,681
WW03 30z	0,024	0,025	0,024	0,025	0,027	0,028
WW03 40z	0,026	0,027	0,025	0,026	0,028	0,029
WW04 30z	0,193	0,150	0,195	0,152	0,197	0,160
WW04 40z	0,204	0,156	0,202	0,155	0,206	0,164
WW05 30z	0,266	0,205	0,317	0,284	0,275	0,224
WW05 40z	0,281	0,221	0,283	0,223	0,284	0,237
WW06 30z	0,286	0,244	0,279	0,239	0,287	0,255
WW06 40z	0,293	0,253	0,290	0,251	0,302	0,273
durchschnittliche Verbesserung	12,4 %	23,5 %	11,9 %	22,1 %	18,3 %	28,7 %

Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Approximationsmethoden fällt auf, dass nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Werten der einzelnen Fälle liegen. Der Unterschied liegt dabei bei allen Fällen sowohl bei den Drat- als auch den Sensordaten unter 5 %. Das bedeutet, dass mit beiden Methoden der Nadirwert für die Schätzung des Blattflächenindex hinreichend genau abgeleitet werden kann. Die höhere Genauigkeit der schrittweisen Polynomkurvenapproximation scheint bei der Schätzung des Blattflächenindex bei dieser Untersuchung keinen deutlichen Vorteil zu bewirken.

Der Blick auf die Sensordaten zeigt bereits Bekanntes. Die Ergebnisse der EnMAP-Daten zeigen bis auf wenige Ausnahmen (WW05 30z bei der flächenhaften und der schrittweisen Methode) bessere Werte für den RMSE als die der Sentinel-2-Daten. Hier sind aber die Unterschiede eher gering (durchschnittlich zwischen 5 % und 10 %) im Gegensatz zu den Ergebnissen der Approximation und der Nadirwertbestimmung. Auch hier scheint die Bestimmung des Nadirwertes bei den Sentinel-2-Daten hinreichend genau zu sein, um bei der Schätzung des Blattflächenindex ähnliche Ergebnisse zu erreichen, trotz der Nutzung rauschsensitiver Indizes. Die Transformationsfunktion stellt eine Ausgleichung über alle VIDFs des jeweiligen Index dar. Dabei wird das Rauschen der VIDF geglättet, welches sich positiv auf die Korrelation auswirkt.

6.3.2 Fazit

Am Beispiel des Blattflächenindex wurde gezeigt, dass auch die Schätzung biophysikalischer Parameter aus verschiedenen Schrägblickbeobachtungen mittels der entwickelten Transformationsfunktion gut möglich ist. Die Güte der Schätzung des LAI ist dabei wiederum von der Güte der Nadirwertbestimmung abhängig.

7 Ausblick

In dieser Arbeit wurde – im Hinblick auf die EnMAP-Mission – eine Methodik zur Bestimmung der Nadirwerte von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen entwickelt.

Dafür wurde zunächst ein spektrales, räumliches und zeitliches Simulationsmodell zur Simulation bodennaher Getreidebestandsreflexion basierend auf detaillierten 4D-Pflanzen entwickelt, die in einem weiteren Schritt durch eine End-to-End-Simulation in sensorspezifische EnMAP- und Sentinel-2-Reflexionsspektren umgewandelt werden können. Im nächsten Teil der Arbeit wurden am Beispiel solcher simulierter Reflexionsspektren von virtuellen 3D-Getreidebeständen verschiedene Einflüsse der Bestandsstruktur auf Reflexionssignale unterschiedlicher Beobachtungsrichtungen sowie auf daraus abgeleitete Vegetationsindizes untersucht. Unter Nutzung der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden schließlich zwei Methoden entwickelt, womit der Nadirwert eines Vegetationsindex aus Schrägblickbeobachtungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bestandsstrukturen bestimmt werden kann. Beide Methoden wurden dabei auf künstliche EnMAP- und Sentinel-2-Daten erfolgreich angewendet.

Die erfolgreiche Bestimmung der Nadirwerte aus verschiedenen Schrägblickbeobachtungen ermöglicht die Vergleichbarkeit mehrerer Szenen unterschiedlicher Beobachtungsrichtungen mit ähnlichem Sonnenzenitwinkel, wie es bei den EnMAP-Daten sein wird ($-30^\circ < \theta_{EnMAP} < 30^\circ$) und die Korrektur der Vegetationsindizes von Bildszenen, die durch große Unterschiede der Beobachtungsrichtung beeinflusst sind, wie es vor allem bei flugzeuggetragenen Aufnahmen der Fall ist (z.B. HyMap mit einem FOV von 61.3°). Sie kann somit zur besseren Auswertung fernerkundlicher Daten beitragen, welches eine wesentliche Voraussetzung für die Charakterisierung von Vegetationsbeständen, speziell von Getreidebeständen, mittels Fernerkundungsdaten ist. Zwar muss die Funktion für die Nadirwertableitung für jeden gewünschten Fall (Pflanzenart, Wachstumsstadium, Sonnenzenitwinkel) extra bestimmt und vorgehalten werden. Sind jedoch erst einmal alle notwendigen Bestände modelliert und von allen notwendigen Beobachtungspositionen aus abgetastet worden, ist die Bestimmung der verschiedenen Transformationsfunktionen mittels der entwickelten Methodik mit wenig Aufwand umsetzbar.

Aus der Arbeit ergeben sich folgende Erkenntnisse und Diskussionspunkte:

- Ein Nebenprodukt dieser Arbeit ist die Feststellung der Existenz rauschrobuster und rauschsensitiver Vegetationsindizes. Diese Aussage kann zwar zunächst nur auf die 8 untersuchten Vegetationsindizes (sensitiv sind SR, MSR, NDVI und WDRVI; robust sind OSAVI, MSAVI, DVI und RDVI) angewendet werden, jedoch stellen diese Indizes eine Gruppe sehr gebräuchlicher und auch teilweise operationell genutzter Indizes dar. Die Kenntnis rauschrobuster Indizes ermöglicht die bessere Nutzung von Daten, die durch ein geringeres SNR gekennzeichnet sind, wie es zum Beispiel bei Hyperion-Daten der Fall ist (Boardman, 2002).

- Vergleich der beiden entwickelten Methoden: In Kap. 6 dieser Arbeit wurden zwei Methoden zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen beschrieben. Beide Methoden nutzen die gleiche Datenbasis und sie basieren beide auf derselben Annahme sowie einer Polynomregression. Bei der Polynomflächenapproximation erfolgt eine zweidimensionale Regression, mit dem Ziel die VIDs im gesamten beobachteten Bereich auf der Hemisphäre über dem Ziel mathematisch zu beschreiben. Bei der schrittweisen Polynomkurvenapproximation erfolgen hingegen mehrere eindimensionale Regressionen pro Azimutrichtung, ebenfalls mit dem Ziel, die VIDs im gesamten beobachteten Bereich auf der Hemisphäre über dem Ziel mathematisch zu beschreiben. Dabei stellte sich heraus, dass die schrittweise Polynomkurvenapproximation bei allen untersuchten Fällen und Indizes die bessere Genauigkeit lieferte, weil dadurch die lokalen Gegebenheiten der VIDs (z.B. lokale Maxima oder Minima) besser berücksichtigt werden können als bei einer flächenhaften Regression. Der Vorteil der flächenhaften Methode dagegen ist, dass nur eine Funktion ermittelt werden muss, um alle gewünschten Azimut- und Zenitwinkel in die Funktion einzubeziehen. Bei der schrittweisen Methode müssen hingegen mehrere Funktionen, jeweils eine für eine bestimmte Azimutrichtung, ermittelt werden. Dabei stellt sich die Frage, wieviele Funktionen und vor allem welche Azimutrichtungen müssen ermittelt werden, um die Nadirwertableitung für alle gewünschten Beobachtungspositionen anbieten zu können. Zudem wurde bei dem Test, den Blattflächenindex mit den umgewandelten Nadirwerten zu schätzen, nur noch bei den Sentinel-2-Daten ein eher geringer Vorteil bezüglich der Genauigkeit bei der schrittweisen Methode festgestellt. Die Entscheidung, welche Methode Verwendung findet, sollte daher nicht nur von der Genauigkeit abhängig gemacht werden, sondern auch von dem Produkt, das mittels der Indizes erzeugt werden soll (z.B. Vergleich der Vegetationszustände zwischen mehreren Szenen oder zur Schätzung biophysikalischer Parameter).
- Die Annahme, die VIDs eines Vegetationsindex beschreiben eine Isoflächenschar, deren Wertunterschiede aus einer linearen Verschiebung entlang der Kote hervor gehen, ergab sich aus den Beobachtungen der unterschiedlichen VIDs, vor allem für die Indizes MSA-VI, DVI und RDVI. Bei den anderen Indizes trifft diese Annahme nur eingeschränkt zu, nämlich nur für Bestände mit ähnlichen Bestandsstrukturmerkmalen. Die abgeleiteten Nadirwerte werden bei diesen Indizes für sehr lichte und sehr dichte Bestände viel stärker überschätzt, als es der RMSE angibt. Für mitteldichte Bestände kann dagegen ein viel geringerer Fehler Angenommen werden als der RMSE. Eine Möglichkeit, dem entgegen zu wirken und dabei auch die Genauigkeit zu steigern, wäre mehrere Transformationsfunktionen für jeweils eine bestimmte Dichte zu bestimmen. Bei der Nutzung dieser Funktionen ist zusätzliches Wissen über die Dichte der jeweils beobachteten Bestände notwendig.
- Die Genauigkeit der ermittelten Nadirwerte ist vom jeweiligen Vegetationsindex sowie von der Pflanzen- und Bestandsarchitektur (Pflanzenart, Wachstumsstadium und Bestandsstrukturmerkmale) abhängig. Denn die durch die Pflanzen- und Bestandsarchitektur wirkenden Einflüsse auf die BRDF werden bei den verschiedenen Vegetationsindizes unterschiedlich stark in der Struktur der VIDF abgebildet (siehe Kap. 5). Diese Einflüsse bestimmen schließlich die Approximationsgenauigkeit der VIDs, die neben der Annahme, auf der die entwickelten Methoden basieren, maßgebend für den Erfolg der Nadirwertbestimmung ist. Entscheidend für die Güte der Nadirwertbestimmung ist dabei die Stärke der Abweichung von der Annahme. Je stärker die Form und die Werteverchiebung der

VIDFs von dieser Annahme abweichen, desto geringer ist in diesem Fall auch die Genauigkeit der geschätzten Nadirwerte.

- Durch zusätzliche Information zum beobachteten Bestand wird eine Steigerung der Genauigkeit erzielt, da sich die Form der VIDFs von Beständen gleicher Merkmale ähneln und somit eine speziellere Transformationsfunktion genutzt werden kann. Dabei ist nicht immer Vorwissen über das beobachtete Gebiet notwendig, denn das würde eine breite operationelle Nutzung einschränken. Zum Beispiel kann die relative Reihenorientierung auch ohne Vorwissen direkt aus den Fernerkundungsbildern abgeleitet werden, indem eine iterative, gefensterte und diskrete Korrelation zwischen einem künstlichem Reihenmuster und dem Originalbild durchgeführt wird. Dabei wird in jeder Iteration das Reihenmuster um einen bestimmten Betrag gedreht, die Korrelation gespeichert und nach Abschluss der Iteration der maximale Korrelationswert, der gleichzeitig der Reihenorientierung entspricht, für dieses Fenster bestimmt (C. Rogaß, persönlich kommuniziert, 2011 und angewendet in (Spengler, 2009)).
- Die Übertragbarkeit der entwickelten Transformationsfunktionen auf reale Fernerkundungsdaten konnte wegen fehlender Daten noch nicht durchgeführt werden. Prinzipiell sollte die Anwendung auf realen Daten möglich sein. Dafür sprechen zwei Gründe. Erstens wurde bei der Validierung des Simulationsmodells festgestellt, dass es möglich ist, realistische mit den Feldmessungen vergleichbare Bestandsspektren zu erzeugen, so dass das typische Problem der Vergleichbarkeit von rein theoretischen Modellspektren und real gemessenen Spektren nicht auftreten sollte. Zweitens wurden die bodennahen Reflexionspektren in sensorspezifische Spektren umgewandelt, so dass auch Einflüsse bedingt durch den Aufnahmeprozess des Sensors (z.B. SNR) und die atmosphärische Korrektur einbezogen wurden. Eine Einschränkung bezüglich der Übertragbarkeit ist allerdings die Tatsache, dass die Untersuchungen bisher auf rein spektraler Ebene durchgeführt wurden. Das bedeutet, dass die Nadirwertableitung theoretisch nur auf reinen Bestandspixeln angewendet werden kann.

Wie schon diskutiert, tragen zusätzliche Informationen zum beobachteten Bestand zur Genauigkeit der ermittelten Nadirwerte bei. Als eine weiterführende Arbeit wäre zum Beispiel die Entwicklung weiterer Methoden zur Extrahierung zusätzlicher Information aus Fernerkundungsdaten denkbar, auch unter Nutzung der in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse. Weiterhin ergab sich beim Vergleich der beiden entwickelten Methoden zur Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen die Frage, für welche und wieviele Azimutrichtungen jeweils eine Funktion ermittelt werden muss, um die Nadirwerte für alle gewünschten Beobachtungspositionen bestimmen zu können. Um eine Transformationsfunktion für die Bestimmung des Nadirwertes von Vegetationsindizes aus Schrägblickbeobachtungen anbieten zu können (zum Beispiel in einer Software, wie die geplante EnMAP-Box (van der Linden et al., 2011)), müssen demnach weitere Untersuchungen bezüglich der Möglichkeit der Interpolation durchgeführt werden.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik können Vegetationsindizes von Getreidebeständen einer Bildszene, die durch große Unterschiede der Beobachtungsrichtung beeinflusst ist, auf den Nadirwert normiert werden, aber auch mehrere Szenen, die von unterschiedlichen Richtungen aus aufgenommen und mit einem ähnlichem Sonnenzenitwinkel beleuchtet

wurden. Der nächste Schritt wäre nun den Nadirwert unterschiedlicher Sonnenzenitwinkel zu normieren, um auch die Vegetationsindizes multitemporaler Szenen, die mit unterschiedlichen Sonnenzenitwinkel beleuchtet wurden, aufeinander zu normieren. Denn dass der Zenitwinkel der Beleuchtungsrichtung einen Einfluss auf den Nadirwert von Vegetationsindizes hat, ist anzunehmen und wurde auch schon mehrfach untersucht und festgestellt (z.B. Middleton, 1991; Qi et al., 1995). Speziell auf diese Arbeit bezogen, müssten die Bestände der unterschiedlichen Getreidearten und Wachstumsstadien unter vielen unterschiedlichen Sonnenzenitwinkeln abgetastet werden, um die Beziehung zwischen Sonnenzenitwinkel und Nadirwert der Vegetationsindizes untersuchen und eine Normierungsfunktion bestimmen zu können.

Die Verwendung von Splines anstelle von Polynomen könnte die Approximationsgenauigkeit und damit die Genauigkeit der Nadirwertbestimmung steigern. Dabei sind sowohl bei der flächenhaften als auch bei der schrittweisen Approximationsmethode Verbesserungen zu erwarten, da sich die Splines optimal jeder Krümmung anpassen können. Diese Verbesserung würde nur einen begrenzten Vorteil bringen, da die Abweichungen von der Annahme, auf der die entwickelten Methoden basieren, einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Nadirwerte hat, als die Approximationsgenauigkeit der mathematischen Funktion. Deshalb sollte bei einer Erweiterung der Methode die Approximation durch Splines realisiert werden, um deren Nutzen auf die Genauigkeit der Nadirwertbestimmung untersuchen zu können. Weiterhin wäre auch eine Verwendung von radialen Basisfunktionen denkbar. Damit wird die Approximation durch eine Summe bestimmter radialer Basisfunktionen angenähert, die verschiedene Zentren haben. Die einzelnen radialen Basisfunktionen können dabei verschiedene Funktionstypen zur Grundlage haben (z.B. polynomielle, Gaußsche oder multiquadratische Funktionen) (Wendland, 2005).

Im Hinblick auf eine weitere Nutzung der entwickelten Methodik ist die Entwicklung von Transformationsfunktionen für weitere Getreidearten und Anbaufrüchte mit den entsprechenden virtuellen 4D-Pflanzenmodellen und dazu passenden spektralen Informationen prinzipiell problemlos möglich. Der Aufbau der 4D-Pflanzenmodelle und die damit verbundene Sammlung der geometrischen und spektralen Information sowie der Informationen zum Verhalten der einzelnen Pflanzenorgane während des Wachstums ist zwar mit einem erheblichen, dafür aber nur einmaligem, Zeitaufwand verbunden. Neben landwirtschaftlichen Beständen ist die Nutzung der entwickelten Methodik zur Bestimmung einer Funktion für die Nadirwertableitung auch für andere Offenlandbestände denkbar, wie z.B. Heidelandschaften oder aufgegebene Truppenübungsplätze, deren Monitoring zunehmend von wissenschaftlichem Interesse ist (Klapkaek, 1997; Itzerott et al., 2010; Lorenz und Osterloh, 2010; Conrad et al., 2010). In diesem Fall sind jedoch zusätzliche Kenntnisse zur Artenverteilung inklusive der zeitlichen Komponente zur Altersverteilung notwendig (Dierschke, 1994), um die natürlichen Beständen realistisch aufzubauen.

Die Übertragung der Methodik auf Forstbestände ist theoretisch denkbar, jedoch gestaltet sich der Aufbau der 4D-Pflanzenmodelle sowie die Sammlung der spektralen Information sehr viel aufwendiger als bei den verwendeten Getreidepflanzen (Spengler, voraussichtlich 2011). Auch der Aufbau des Bestandes erfordert zahlreiche Kenntnisse zur Arten- und zur Altersverteilung. Da schon die Kombination der räumlichen Verteilung nur einer Pflanzenart mit einem Wachstumsmodell zur Modellierung verschiedener Alterstufen laut Förster et al., 2010 für Forstbestände bisher noch nicht realisiert worden ist, liegt der Schwerpunkt im Bereich

der Forstwissenschaft zunächst auf der Modellierung realistischer Bestände, bevor an eine Übertragung der entwickelten Methode gedacht werden kann.

Literaturverzeichnis

- AERONET: Aerosol robotic network. 2010. URL <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>(Stand: 2010/04).
- Albertz, J.: *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft und Satellitenbildern*. Wissenschaftl.Buchgesell., dritte Auflage, 2007.
- Allen, W.A., Gayle, T.V. und Richardson, A.J.: Plant-canopy irradiance specified by the duntley equations. In: *Journal of the Optical Society of America*, Band 60(3):S. 372 – 376, 1970.
- Anderson, G.L, Hanson, J.D und Haas, R.H: Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 45(2):S. 165 – 175, 1993.
- Baghestani, M.A., Zand, E. und Soufizadeh, S.: Iranian winter wheat's (triticum aestivum l.) interference with weeds: II. growth analysis. In: *Pakistan Journal of Weed Science Research*, Band 12(3):S. 131 – 144, 2006.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. und Huete, A.R.: A review of vegetation indices. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 13:S. 95–120, 1995.
- Barczi, J.-F., de Reffye, P. und Caraglio, Y.: Essai sur l'identification et la mise en oeuvre des paramètres nécessaires a la simulation d'une architecture végétale: le logiciel AmapSim. In: Bouchon, J., de Reffye, P. und Barthélémy, D. (Hg.) *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*. INRA Editions, Paris, 1997, S. 205 – 254.
- Barczi, J.-F., Rey, H., Caraglio, Y., de Reffye, P., Barthélémy, D., Dong, Q.X. und Fourcaud, T.: Amapsim: A structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. In: *Annals of Botany*, Band 101:S. 1125 – 1138, 2008.
- Baret, F. und Guyot, G.: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 35:S. 161 – 173, 1991.
- Baret, F., Guyot, G. und Major, D.J.: Crop biomass evaluation using radiometric measurements. In: *Photogrammetria*, Band 43:S. 241 – 256, 1989.
- Baret, F., Weiss, M., Troufleau, D., Prevot, L. und Combal, B.: Maximum information exploitation for canopy characterisation by remote sensing. In: *Aspects of Applied Biology*, Band 60:S. 71 – 82, 2000.
- Belward, A.S.: *Remote sensing and geographical information systems of resource management in developing countries*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Kapitel Spectral characteristics of vegetation, soil and water in visible, near infrared and middle-infrared wavelengths, S. 31 – 53. 1991.
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Hoke, M.L., J.H.Chetwynd, Bernstein, L.S., Shettle,

- E.P., Matthew, M.W. und Adler-Golden, S.M.: Modtran4 version 3 revision 1 user's manual. tech. rep. Technischer Bericht, Air Force Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, USA, 2003.
- Berk, A., Bernstein, L.S. und Robertson, D.C.: Modtran: a moderate resolution model for lowtran7. Technischer Bericht GL-TR-89-0122, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, USA, 1989.
- Blackburn, G.A.: Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 19(4):S. 657 – 675, 1998.
- BMELV: Durchführung der kontrolle durch fernerkundung in deutschland im jahr 2005 - nationaler zusatz als anhang zum lastenheft. Referat 617 Nr. 02285293758, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2004.
- BMELV: Bundesministerium für ernährung, landwirtschaft und verbraucherschutz - Ökologischer landbau. 2010. URL [http://www.bmelv.de\(Stand:2010/07\)](http://www.bmelv.de(Stand:2010/07)).
- Boardman, J.: Hyperion validation in Yellowstone National Park using AVIRIS, HyMap and field spectra. Technischer Bericht, NASA Goddard Space Flight Center, 2002.
- Borel, Christoph C. und Gerstl, Siegfried A. W.: Radiosity modeling for remote sensing applications. In: *ACM SIGGRAPH '93 Course Notes - Making Radiosity Practical*, S. 1 – 15, 1993.
- Borel, Christoph C., Gerstl, Siegfried A.W. und Powers, Bill J.: The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 36(1):S. 13 – 44, 1991.
- Bryant, Ross, Qi, Jiaguo, Moran, M. Susan und Ni, Wanmei: Comparison of brdf models with a fuzzy inference system for correction of bidirectional effects. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 88(3):S. 221 – 232, 2003.
- Buschmann, C.: Fernerkundung von Pflanzen, Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität. In: *Naturwissenschaften*, Band 80:S. 439 – 453, 1993.
- Camillo, P.: A canopy reflectance model based on an analytical solution to the multiple scattering equation. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 23(3):S. 453 – 477, 1987.
- Campbell, J.B.: *Introduction to remote sensing*. Taylor and Francis, London, dritte Auflage, 2002.
- Castel, T., Caraglio, Y., Beaudoin, A. und Borge, F.: Using SIR-C SAR data and the AMAP model for forest attributes retrieval and 3-D stand simulation. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 75(2):S. 279 – 290, 2001.
- Chandrasekhar, S.: *Radiative Transfer Theory*. Dover Publications Inc., 1960.
- Chelle, M. und Andrieu, B.: Radiative models for architectural modeling. In: *Agronomie*, Band 19:S. 225 – 240, 1999.
- Chen, J.M.: Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, Band 22:S. 229 – 242, 1996.
- Chen, J.M. und Cihlar, J.: Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using landsat TM images. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 55(2):S. 153 – 162, 1996.

- Chen, J.M. und Leblanc, S.G.: A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. In: *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, Band 35:S. 1316 – 1337, 1997.
- Chen, J.M., Li, X., Nilson, T. und Strahler, A.: Recent advances in geometrical optical modelling and its applications. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 18(2):S. 227 – 262, 2000.
- Cohen, M.F. und Greenberg, D.P.: The hemi-cube: a radiosity solution for complex environments. In: *SIGGRAPH '85: Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, New York, NY, USA, 1985, S. 31 – 40.
- Cohen, M.F. und Wallace, J.R.: *Radiosity and realistic image synthesis*. Academic Press, 1993.
- Collins, W.: Remote sensing of crop type and maturity. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 44:S. 43 – 55, 1978.
- Conrad, B., Ewald, C., Jurkschat, M., Lehmann, R., Lütkepohl, M., Lüttchwager, D., Graf v. Plettenberg, F., Rödel, I. und Thielemann, L.: Entwicklung von verfahren für die erhaltung von heiden auf munitionsbelasteten flächen. In: *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie*, Band 44(3):S. 123 – 136, 2010.
- Curran, Paul J, Dungan, Jennifer L, Macler, Bruce A und Plummer, Stephen E: The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 35(1):S. 69 – 76, 1991.
- Curran, P.J.: Remote sensing of foliar chemistry. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 30(3):S. 271 – 278, 1989.
- Damm, A.: *Hyperspektrale Fernerkundung zur Ableitung pflanzenphysiologischer Parameter von Stadtbäumen – Strahlungstransfermodellierung für Berliner Kastanienbestände*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 2008.
- Dauzat, J. und Hautecoeur, O.: Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux. In: *ESA. Proceedings of the 5th international colloquium. Physical measurements and signatures in remote sensing. Courchevel, France*. 1991, S. 415–418.
- Dawson, T.P., Curran, P.J. und Plummer, S.E.: LIBERTY - modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 65(1):S. 50 – 60, 1998.
- De Reffye, P., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M. und Puech, C.: Plant models faithful to botanical structure and development. In: *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1988*. 1988, S. 151 – 158.
- Deering, D.W.: *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*. Dissertation, Texas A&M University, College Station, 1978.
- DESA: World population prospects: The 2008 revision. Technischer Bericht, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, USA, 2009.
- Dierschke, H.: *Pflanzensoziologie: Grundlagen und Methoden*. UTB, Stuttgart, 1994.
- Disney, M.I.: *Improved estimation of surface biophysical parameters through inversion of li-*

- near BRDF models*. Dissertation, University College London, Department of Geography, Remote Sensing Unit, 2001.
- Disney, M.I., Lewis, P., Knott, R., Hobson, P., Evans-Jones, K. und Barnsley, M.J.: Validation of a manual measurement method for deriving 3D canopy structure using the BPMS. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 1998*. Seattle, WA, USA, 1998, Band 3, S. 1249 – 1251.
- Disney, M.I., Lewis, P. und Saich, P.: Modelling the radiometric response of a dynamic, 3D structural model of scots pine in the optical and microwave domains. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 2003*. Toulouse, France, 2003, Band 6, S. 3537 – 3539.
- Disney, M.I., Lewis, P. und Saich, P.: 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 100:S. 114 – 132, 2006.
- Doluschitz, R. und Laudien, R.: GIS-gestützte schlagbezogene Dokumentation in der Zuckerrwirtschaft und deren Nutzen. Das Sugar Beet Management Information System (SuMIS). In: *Zeitschrift für Agrarinformatik*, Band 13(11941):S. 55 – 63, 2005.
- Dosio, G.A.A., Rey, H., Lecouer, J., Izquierdo, N.G. und Aguirrezabal, L.A.N.: A whole-plant analysis of the dynamics of expansion of individual leaves of two sunflower hybrids. In: *Journal of Experimental Botany*, Band 54:S. 2541 – 2552, 2003.
- Drusch, M., Gascon, F., Berger, M., Drinkwater, M., Spoto, F., Aschbacher, J. und Briggs, S.: Gmes sentinel-2 mission requirements document. MRD Final EOP-SM/1163/MR-dr, European Space Agency, 2010.
- Dymond, J.R. und Qi, J.: Reflection of visible light from a dense vegetation canopy - a physical model. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, Band 86(3-4):S. 143 – 155, 1997.
- Elvidge, C.D. und Chen, Z.: Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 54:S. 38 – 48, 1995.
- Elvidge, Christopher D.: Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 11(10):S. 1775 – 1795, 1990.
- Erasmi, S.: *Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen*. Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, 2002.
- ESA: European space agency. (Stand: 2010/11), 2010. URL <http://www.esa.int/esaLP/LPgmes.html>.
- FAO: Food and agriculture organization of the united nations. (Stand: 2010/05), 2010. URL <http://faostat.fao.org>.
- Feingersh, T., Ben-Dor, E. und Filin, S.: Correction of reflectance anisotropy: a multi-sensor approach. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 31(1):S. 49 – 74, 2010.
- Féret, J.-B., François, C., Asner, G.P., Gitelson, A.A., Martin, R.E., Bidet, L.P.R., Ustin, S.L., le Maire, G. und Jacquemoud, S.: PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical

- properties model separating photosynthetic pigments. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 112(6):S. 3030 – 3043, 2008.
- Filella, I. und Penuelas, J.: The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 15:S. 1459 – 1470, 1994.
- Förster, M., Spengler, D., Buddenbaum, H., Hill, J. und Kleinschmit, B.: Ein Überblick über die kombination spektraler und geometrischer modellierung zur anwendung in der forstlichen fernerkundung. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Band 4:S. 253 – 265, 2010.
- Fosket, D.E.: *Plant Growth and Development: A Molecular Approach*. Academic Press, San Diego, CA, USA, erste Auflage, 1994.
- Ganapol, B.D., Johnson, L.F., Hammer, P.D., Hlavka, C.A. und Peterson, D.L.: LEAF-MOD: A new within-leaf radiative transfer model. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 63(2):S. 182 – 193, 1998.
- García-Haro, F.J., Gilabert, M.A. und Meliá, J.: A radiosity model for heterogeneous canopies in remote sensing. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 104(D10):S. 12159 – 12175, 1999.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V. und Zagolski, F.: Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 58(2):S. 131 – 156, 1996.
- Gates, D.M.: *Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., Kapitel Physical and physiological properties of plants, S. 224 – 252. 1970.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. und Weidner, V.R.: Spectral properties of plants. In: *Applied Optics*, Band 4(1):S. 11 – 20, 1965.
- Gerstl, S.A.W.: The angular reflectance signature of the canopy hot spot in the optical regime. In: *Proceedings of the 4th. International Colloquium Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 18-22 January 1988, Aussois, France*. 1988, S. 129 – 132.
- Gitelson, A.A.: Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. In: *Journal of Plant Physiology*, Band 161:S. 165 – 173, 2004.
- Gitelson, A.A. und Merzylak, M.N.: Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of aesculus hippocastanum l. and acer platanoides l. leaves. spectral features and relation to chlorophyll estimation. In: *Journal of Plant Physiology*, Band 143:S. 286 – 292, 1994.
- GMES: Global monitoring for environment and security. 2010. URL [http://www.gmes.info\(Stand:2010/11\)](http://www.gmes.info(Stand:2010/11)).
- Goel, N.S.: Models of vegetation canopy reflectance and their use in the estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 4:S. 1 – 222, 1988.
- Goel, N.S. und Grier, T.: Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopy from reflectance data: iii. trim: a model for radiative transfer in heterogeneous

- three dimensional canopies. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 25:S. 255 – 293, 1988.
- Goel, N.S., Knox, L.E. und Norman, J.M.: From artificial to real life:computer simulation of plant growth. In: *International Journal of General Systems*, Band 18:S. 291 – 319, 1991.
- Goel, N.S. und Strebel, D.E.: Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. In: *Agronomy Journal*, Band 76(5):S. 800 – 802, 1984.
- Goral, C.M., Torrance, K.E., Greenberg, D.P. und Battaile, B.: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In: *SIGGRAPH 1984. Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1984, Band 18, S. 213 – 222.
- Govaerts, Y. und Verstraete, M.M.: Raytran: A monte carlo ray tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. In: *IEEE Transactions on Geosience and Remote Sensing*, Band 36:S. 493 – 505, 1998.
- Govaerts, Y.M.: *A model of light scattering in three-dimensional plant canopies: A Monte Carlo ray tracing approach*. Dissertation, Univerité Catholique de Louvain, 1996.
- Goward, Samuel N. und Huemmrich, Karl F.: Vegetation canopy par absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the sail model. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 39(2):S. 119 – 140, 1992.
- Grant, L.: Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 22(2):S. 309 – 322, 1987.
- Guanter, L., Richter, R. und Kaufmann, H.: On the application of the modtran4 atmospheric radiative transfer code to optical remote sensing. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 30(6):S. 1407 – 1424, 2009.
- Gutschick, V.P. und Wiegel, F.W.: Radiation transfer in vegetative canopies and other layered media: rapidly solvable exact integral equation not requiring fourier resolution. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Band 31:S. 71 – 82, 1984.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Tejada, P.J. Zarco und Strachan, I.B.: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predefecting green lai of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 90:S. 337 – 352, 2004.
- Häder, P.: *Photosynthese*. Thieme Verlag, Stuttgart, 1999.
- Haken, H. und Wolf, H.C.: *Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 2004.
- Hancock, D.W. und Dougherty, C.T.: Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa. In: *Crop Science*, Band 47:S. 2547 – 2556, 2007.
- Hansen, P. M. und Schjoerring, J. K.: Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 86(4):S. 542 – 553, 2003.
- Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S. und Walthall, C.L.: Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. In: *Agronomy Journal*, Band 100:S. 117 – 131, 2008.

- Heath, O.V.S.: *Physiologie der Photosynthese*. Georg Thieme Verlag, 1972.
- Hoffer, R.M.: *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, McGraw-Hill College, New York, USA, Kapitel Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data, S. 297 – 343. 1978.
- Huang, W., Wang, J., Wang, Z., Ma, Z. und Zhao, C.: Winter wheat geometry identification by bidirectional canopy reflected spectrum. In: *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Band 1(2):S. 27 – 31, 2008.
- Huemmerich, K.F.: The geosail model: a simple addition to the sail model to describe discontinuous canopy reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 75(3):S. 423 – 431, 2001.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. und Ferreira, L.G.: Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 83(1-2):S. 195 – 213, 2002.
- Huete, A.R.: A soil-adjusted vegetative index (SAVI). In: *Remote Sensing of Environment*, Band 25:S. 295 – 309, 1988.
- Huete, A.R.: *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York, USA, Kapitel Chapter4: Soil influences in remotely-sensed vegetation canopy spectra, S. 107–141. 1989.
- Hüter, J. und Klöble, U.: Elektronik, Satelliten und Co. – Precision Farming in der Praxis. Technischer Bericht KTBL-Heft 52, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2005.
- Itzerott, S. und Kaden, K.: Gütebewertung für die klassifizierung landwirtschaftlicher fruchtarten aus spektralen normkurven. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Band 2:S. 109 – 120, 2007.
- Itzerott, S., Kühling, M., Neumann, C. und Weiß, G.: Entwicklung und erprobung eines innovativen, naturschutzfachlichen monitoringverfahrens auf der basis von fernerkundungsdaten am beispiel der döberitzer heide, brandenburg. Technischer Bericht 26257-33/0, DBU Projekt, Zwischenbericht Abschluss Projektphase 1, Potsdam, 2010.
- Jackson, R.D., Teillet, P.M., Slater, P.N., Fedosejevs, G., Jasinski, M.F., Aase, J.K. und Moran, M.S.: Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 32(2-3):S. 189 – 202, 1990. Coincident Satellite, Aircraft, and Field Measurements at the Maricopa Agricultural Center (MAC).
- Jacquemoud, S. und Baret, F.: PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 34:S. 75 – 91, 1990.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C. und Ustin, S.L.: PROSPECT+SAIL: 15 Years of Use for Land Surface Characterization. In: *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006*. 2006, S. 1992 – 1995.
- Jarmer, T., Kötz, B. und Atzberger, C.: Spektroradiometrische ableitung biophysikalischer vegetationsparameter von weizenbeständen: Vergleichende untersuchung verschiedener empirisch-statistischer verfahren. In: *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformatik*, Band 1:S. 43 – 50, 2003.

- Jordan, C.F.: Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. In: *Ecology*, Band 50:S. 663 – 666, 1969.
- Jupp, D.L.B. und Strahler, A.H.: A hotspot model for leaf canopies. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 38(3):S. 193 – 210, 1991.
- Kajiya, J.T.: The rendering equation. In: Evans, D.C. und Athay, R.J. (Hg.) *SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, New York, NY, USA, 1986, S. 143 – 150.
- Kanemasu, E.T.: Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 3(1):S. 43 – 47, 1974.
- Kaufmann, H., Segl, K., Chabrillat, S., Mueller, A., Richter, R., Hofer, G. Schreierand S., Stuffer, T., Haydn, R., Bach, H. und Benz, U.: Enmap – an advanced hyperspectral mission. In: *Proceedings of the 4th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy (Warsaw 2005)*. 2005.
- Kaufmann, H., Segl, K., Guanter, L., Förster, K.-P., Stuffer, T., Müller, A., Richter, R., Bach, H., Hostert, P. und Chlebek, C.: Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) - Recent advances and status. In: *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 6-11, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*. 2008.
- Klapkaek, N.: Monitoring der sukzession auf ehemaligen truppenübungsplätzen - beispielhaft dargestellt an untersuchungen von trockenlebensräumen auf dem ehemaligen truppenübungsplatz jüterbog west. Institut für Ökologie und Naturschutz, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung, 1997.
- Klisch, A.: *Ableitung von Blattflächenindex und Bedeckungsgrad aus Fernerkundungsdaten für das Erosionsmodell EROSION 3D*. Dissertation, Universität Potsdam, 2003.
- Knipling, E. B.: Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 1:S. 155 – 159, 1970.
- Knyazikhin, Y.V., Marshak, A.L. und Myneni, R.B.: Interaction of photons in a canopy of finite-dimensional leaves. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 39(1):S. 61 – 74, 1992.
- Kraus, K. und Schneider, W.: *Fernerkundung, Band1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Dümmler Verlag, Bonn, 1988.
- Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S. und Skidmore, A.: *Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications*, Kluwer Academic Publishers, Enschede, Netherlands, Kapitel Imaging spectrometry and vegetation science, S. 111 – 155. 2001.
- Kuusk, A.: *Photon-Vegetation Interactions. Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*, Springer, Berlin, Kapitel The hot spot effect in plant canopy reflectance, S. 139 – 159. 1991.
- Lakshmikantham, V. und Rao, M.R.M.: *Theory of integro-differential equations*. Gordon and Breach Science Publishers, 1995.
- Landis, B. und Aber, J.S.: Low-cost field goniometer for multiangular reflectance measurements. In: *Emporia State Research Studies*, Band 44(1):S. 1 – 6, 2007.

- le Maire, G., François, C. und Dufrêne, E.: Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 89(1):S. 1 – 28, 2004.
- Lee, K.-S., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Maersperger, T.K. und Gower, S.T.: Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 91(3-4):S. 508 – 520, 2004.
- Lewis, P.: *A botanical plant modelling system for remote sensing simulation studies*. Dissertation, University of London, 1996.
- Lewis, P.: Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the botanical plant modelling system. In: *Agronomie*, Band 19:S. 185 – 210, 1999.
- Lewis, P. und Disney, M.I.: The botanical plant modelling system (bpms): a case study of multiple scattering in a barley canopy. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 1998*. Seattle, Washington, USA, 1998.
- Lewis, P. und Muller, J. P.: The Advanced Radiometric Ray Tracer: ARARAT for plant canopy reflectance simulation. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.*, Band 29:S. 26 – 34, 1992.
- Lewis, P., Saich, P., Disney, M.I., Andrieu, B., Fournier, C. und Ljutovac, S.: Modelling the radiometric response of a dynamic, 3D structural model of wheat in the optical and microwave domains. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 2003*. Toulouse, France, 2003, Band 6, S. 3543 – 3545.
- Li, X. und Strahler, A.H.: Geometric - optical modeling of a conifer forest canopy. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band GE-23:S. 705 – 721, 1985.
- Li, X. und Strahler, A.H.: Geometric - optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band GE-24(6):S. 906 – 919, 1986.
- Liang, S.: *Quantitative remote sensing of land surfaces*. John Wiley & Sons, 2004.
- Liang, S. und Strahler, A.H.: Calculation of the angular radiance distribution for a coupled atmosphere and canopy. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 31(2):S. 491 – 502, 1993.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. und Chipman, J.W.: *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, 6. Auflage, 2008.
- Lorenz, A. und Osterloh, S.: 2. zwischenbericht für die deutsche bundestiftung umwelt (dbu). entwicklung von kosteneffizienten strategien zum erhalt und zur entwicklung von ffh-offenlandlebensräumen auf grossen flächen. erarbeitung, umsetzung und evaluierung von pflegestrategien für das modellgebiet oranienbaumer heide. Technischer Bericht Az 25424/02 – 33/0, Hochschule Anhalt Bernburg, 2010.
- Lüdeker, W. und Günther, K.P.: Leaf reflectance: A stochastic model for analysing the blue shift. In: *Proceedings of Symposium on Global and Environmental Monitoring Techniques and Impacts, Victoria (BC), 17-21 September 1990*. 1990, S. 475 – 480.
- Lyon, J., Yuan, D., Lunetta, R. und Elvidge, C.: A change detection experiment using vegetation indices. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 64:S. 143 –

- 150, 1998.
- Maas, S.J. und Dunlap, J.R.: Reflectance, transmittance and absorptance of light by normal, etiolated and albino corn leaves. In: *Agronomy Journal*, Band 81:S. 105 – 110, 1989.
- Maier, S. W.: *Modeling the Radiative Transfer in Leaves in the 300nm to 2.5µm Wavelength Region taking into Consideration Chlorophyll Fluorescence - The Leaf Model SLOPE*. Dissertation, Technische Universität München, 2000.
- Maier, S.W., Lüdeker, W. und Günther, K.P.: SLOP: A revised version of the stochastic model for leaf optical properties. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 68(3):S. 273 – 280, 1999.
- Marshak, A.L.: Effect of the hot spot on the transport equation in plant canopies. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Band 42:S. 615 – 630, 1989.
- Mayer, B. und Kylling, A.: Technical note: The libradtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Band 5(7):S. 1855 – 1877, 2005.
- Metternicht, G.: Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 24(14):S. 2855 – 2877, 2003.
- Mialet-Serra, I., Dauzat, J. und Auclair, D.: Using plant architectural models for estimation of radiation transfer in a coconut-based agroforestry system. In: *Agroforestry Systems*, Band 53(2):S. 141 – 149, 2001.
- Middleton, E.M.: Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 38(1):S. 45 – 62, 1991.
- Miller, J.R., Berger, M., Goulas, Y., Louis, S. Jacquemoud J., Moise, N., Moreno, G. Mohammed J., Moya, I., Pedrós, R., Verhoef, W. und Zarco-Tejada, P.J.: Development of a vegetation fluorescence canopy model. Technischer Bericht ESA-ESTEC contract no. 16365/02/NL/FF, ESA, 2005.
- Miller, J.R., Hare, E.W. und Wu, J.: Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. an inverted-gaussian reflectance model. In: *International Journal of Remote Sensing*, Band 11(10):S. 1755 – 1773, 1990.
- Monteith, J.L.: *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 1973.
- Myers, V.I.: *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*, National Academy of Sciences, Washington D.C., Kapitel Soil, water and plant relations, S. 253 – 297. 1970.
- Myneni, R.B., Gutschick, V.P., Asrar, G. und Kanemasu, E.T.: Photon transport in vegetation canopies with anisotropic scattering part i. scattering phase functions in one angle. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, Band 42(1):S. 1 – 16, 1988.
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W. und Limperis, T.: Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Technischer Bericht, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234, 1977.
- Nilson, T. und Kuusk, A.: A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 27(2):S. 157 – 167, 1989.

- Norman, J. M. und Welles, J. M.: Radiative transfer in an array of canopies¹. In: *Agronomy Journal*, Band 75(3):S. 481 – 488, 1983.
- North, P.R.J.: Three-dimensional forest light interaction model using a monte carlo method. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 34(5):S. 946 – 956, 1996.
- Nusselt, W.: Graphische bestimmung des winkelverhältnisses bei der wärmestrahlung. In: *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Band 72(20):S. 673, 1928.
- Pinty, B., Verstraete, M.M. und Dickinson, R.E.: A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies 2. inversion and validation. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 95(D8):S. 11767 – 11775, 1990.
- Pinty, B., Widlowski, J.-L., Taberner, M., Gobron, N., Verstraete, M.M., Disney, M., Gascon, F., Gastellu, J.-P., Jiang, L., Kuusk, A., Lewis, P., Li, X., Ni-Meister, W., Nilson, T., North, P., Qin, W., Su, L., Tang, S., Thompson, R., Verhoef, W., Wang, H., Wang, J., Yan, G. und Zang, H.: Radiation transfer model intercomparison (rami) exercise: Results from the second phase. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 109(D06210):S. 19, 2004.
- Pinty, Bernard, Gobron, Nadine, Widlowski, Jean-Luc, Gerstl, Sigfried A. W., Verstraete, Michel M., Antunes, Mauro, Bacour, Cédric, Gascon, Ferran, Gastellu, Jean-Philippe, Goel, Narendra, Jacquemoud, Stéphane, North, Peter, Qin, Wenhan und Thompson, Richard: Radiation transfer model intercomparison (rami) exercise. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 106(D11):S. 11937 – 11956, 2001.
- Purves, W.K., Orians, G.H, Heller, C. und Sadava, D.: *Life: The Science of Biology*. Sinauer Associates and W.H. Freeman, fünfte Auflage, 1998.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. und Sorooshian, S.: A modified soil adjusted vegetation index. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 48(2):S. 119 – 126, 1994.
- Qi, J., Moran, M. S., Cabot, F. und Dedieu, G.: Normalization of sun/view angle effects using spectral albedo-based vegetation indices. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 52(3):S. 207 – 217, 1995.
- Qin, W. und Goel, N.S.: An evaluation of hotspot models for vegetation canopies. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 13:S. 121 – 159, 1995.
- Qin, Wenhan und Gerstl, Siegfried A. W.: 3-d scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 74(1):S. 145 – 162, 2000.
- Reth, S.: *Strukturelle Erfassung eines Traubeneichenwaldes (Quercus petraea) mit Rotbuchenunterwuchs (Fagus sylvatica) und Analyse der chemischen Heterogenität der Eichenblätter*. Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern, 2000.
- Richards, J.A. und Jia, X.: *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*. Springer, vierte Auflage, 2005.
- Rondeaux, G., Steven, M. und Baret, F.: Optimization of soil-adjusted vegetation indices. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 55(2):S. 95 – 107, 1996.
- Rosema, A., Verhoef, W., Schroote, J. und Snel, J.F.H.: Simulating fluorescence light-canopy

- interaction in support of laser-induced fluorescence measurements. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 37(2):S. 117 – 130, 1991.
- Ross, J.: *Radiation regime and architecture of plant stands*. Dr. W. Junk, The Hague, Netherlands, 1981.
- Ross, J.K. und Marshak, A.L.: Calculation of canopy bidirectional reflectance using the monte carlo method. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 24(2):S. 213 – 225, 1988.
- Ross, J.K. und Marshak, A.L.: The influence of leaf orientation and the specular component of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 27(3):S. 251 – 260, 1989.
- Ross, J.K. und Marshak, A.L.: Influence of crop architecture on crop BRDF: A monte-carlo simulation. In: *Proceedings of the 4th. International Colloquium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, 14-18 January 1991, Courchevel, France*. 1991, S. 357 – 360.
- Roujean, J.-L., Leroy, M. und Deschamps, P.-Y.: A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 97(D18):S. 20455 – 20468, 1992.
- Roujean, Jean-Louis und Breon, François-Marie: Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 51(3):S. 375 – 384, 1995.
- Rouse, J.W., Haas, H.R., Deering, D.W., Schell, J.A. und Harlan, J.C.: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Type iii final report, NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland, USA, 1974.
- Saich, P., Lewis, P. und Disney, M.I.: Biophysical parameter retrieval from forest and crop canopies in the optical and microwave domains using 3D models of canopy structure. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 2003*. Toulouse, France, 2003, Band 6, S. 3546–3548.
- Saich, P., Lewis, P., Disney, M.I. und Thackrah, G.: Comparison of Hymap/E-SAR data with models for optical reflectance and microwave scattering from vegetation canopies. In: Wilson, A. (Hg.) *Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. Sheffield, UK, 2002, S. 75 – 80.
- Sandmeier, S.R.: Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 73(3):S. 257 – 269, 2000.
- Sandmeier, S.R. und Deering, D.W.: Structure analysis and classification of boreal forests using airborne hyperspectral brdf data from asas. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 69(3):S. 281 – 295, 1999.
- Sandmeier, St., Müller, Ch., Hosgood, B. und Andreoli, G.: Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 66(2):S. 222 – 233, 1998.
- Sang, B., Schubert, J., Kaiser, S., Mogulsky, V., Neumann, C., Förster, K.-P., Hofer, S., Stuffer, T., Kaufmann, H., Müller, A., Eversberg, T. und Chlebek, C.: The enmap hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration, and technologies. In:

- Proceedings of SPIE Conf. Imaging Spectrometry XIII*. San Diego, CA, US, 2008, Band 7086.
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S. und Martonchik, J.V.: Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 103(1):S. 27 – 42, 2006.
- Schneider, T., Schopfer, J., Oppelt, N., Dorigo, W., Vreeling, W. und Gege, P.: Gonioexp06 - a field goniometer intercomparison campaign, in support of physical model inversion and upscaling methods for hyperspectral, multispectral rs data. In: ESA (Hg.) *Proceedings of Envisat Symposium 2007, Montreux Switzerland*. Montreux, 2007.
- Schowengerdt, R.A.: *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Academic Press, zweite Auflage, 1997.
- Segl, K.: Simulation-based case studies for optimization of sensor design and image-based parameter retrieval using the EnMAP scene simulator. In: *Proceedings of the Hyperspectral Workshop 2010, 17-19 March 2010, ESA-ESRIN, Frascati, Italy*. 2010.
- Segl, K., Guanter, L., Kaufmann, H., Schubert, J., Kaiser, S., Sang, B. und Hofer, S.: Simulation of spatial sensor characteristics in the context of the enmap hyperspectral mission. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 48(7):S. 3046 – 3054, 2010.
- Segl, K., Kaufmann, H. und Richter, R.: Study for the consolidation of the sentinel-2 spectral, radiometric and spatial resolution requirements, esa contract 19962/06/nl/el, 2006.
- Shibayama, M. und Wiegand, C.L.: View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 18(1):S. 91 – 103, 1985.
- Shultis, J.K. und Myneni, R.B.: Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Band 39(2):S. 115 – 129, 1988.
- Spengler, D.: Determination of crop types in hyperspectral image data using simulated reflectance data. 5th PhD-Day at GFZ, 23 November 2009, Potsdam, 2009.
- Spengler, D.: *Anwendung dreidimensionaler Bestandsmodelle für die Charakterisierung von Getreidearten aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten*. Dissertation, Freie Universität Berlin, voraussichtlich 2011.
- Strahler, A.H.: Vegetation canopy reflectance modeling – recent developments and remote sensing perspectives. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 15:S. 179 — 194, 1997.
- Strobl, P.: Dissertation: Entwicklung von verfahren zur datenaufbereitung und kalibrierung eines abbildenden spektrometers am beispiel des dais 7915. Scientific Technical Report STR00/12, GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam, Germany, 2000.
- Strub, G., Beisl, U., Schaepman, M., Schlaepfer, D., Dickerhof, C. und Itten, K.: Evaluation of diurnal hyperspectral hdrf data acquired with the rsl field goniometer during the daisex'99 campaign. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 57(3):S. 184 – 193, 2002.
- Suits, G.H.: The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. In: *Remote*

- Sensing of Environment*, Band 2:S. 117 – 125, 1972.
- Tang, Y., Liu, Q., Chen, L.-F., Liu, Q. und Du, Y.: Normalization of sun/view angle effects in vegetation index using BRDF of typical crops. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings of IGARSS 2004*. Anchorage, AK, 2004, Band 6, S. 4063 – 4065.
- Thompson, R.L. und Goel, N.S.: Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance: Photon spread (ps) model and statistical photon spread (sps) model. In: *Remote Sensing Reviews*, Band 16:S. 157 – 207, 1998.
- Thuillier, G., Hersé, M., Simon, P.C., Labs, D., Mandel, H., Gillotay, D. und Foujols, T.: The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 1-2-3 and EURECA missions. In: *Solar Physics*, Band 214(1):S. 1 – 22, 2003.
- Tucker, C. J.: Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status. Technischer Bericht NASA-TM-X-71388, NASA / Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1977.
- van der Linden, S., Rabe, A., ao, P. Leit und Hostert, P.: The EnMAP-Box: a toolbox for processing and analysis of EnMAP data. In: *Proceedings of 7th EARSeL SIG IS Workshop. Edinburgh, Scotland, UK*. 2011.
- van der Meer, F.D. und de Jong, S.M.: *Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications*. Kluwer Academic Publishers, Enschede, Netherlands, 2001.
- Verdebout, J., Jacquemoud, S. und Schmuck, G.: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, ECSC, EEC, EAEC, Brussels, Luxembourg, Kapitel Optical properties of leaves: modelling and experimental studies, S. 169 – 191. 1994.
- Verhoef, W.: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 16(2):S. 125 – 141, 1984.
- Verhoef, W., Jia, L., Xiao, Q. und Su, Z.: Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 45:S. 1808 – 1822, 2007a.
- Verhoef, W., Jiang, L. und Suits, Z.: Optical - thermal canopy radiance directionality modeling by unified 4sail model. Technischer Bericht NLR-TP-2007-242, National Aerospace Laboratory NLR, 2007b.
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuze, J.L., Herman, M. und Morcrett, J.J.: Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Band 35:S. 675 – 686, 1997.
- Verstraete, M.M., Pinty, B. und Dickinson, R.E.: A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies 1. theory. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 95(D8):S. 11755 – 11765, 1990.
- Voges, E. und Petermann, K. (Hg.): *Optische Kommunikationstechnik. Handbuch für Wissenschaft und Industrie*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.
- Wälder, O.: *Mathematical methods for engineers and geoscientists*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.

- Weidenbacher, U.: Beleuchtungsmodelle. Vorlesungsmaterialien. Medieninformatik. Universität Ulm. 2002.
- Wendland, H.: *Scattered Data Approximation*. Cambridge University Press, 2005.
- Widlowski, J.-L., Taberner, M., Pinty, B., Bruniquel-Pinel, V., Disney, M., Fernades, R., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Gobron, N., Kuusk, A., Lavergne, T., Leblanc, S., Lewis, P., Martin, E., Ottus, M. M. North, P.R.J., Qin, W., Robustelli, M., Rochdi, N., Ruiloba, R., Soler, C., Thompson, R., Verhoef, W., Verstraete, M.M. und Xie, D.: The third RAdiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance models. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 112(D09111):S. 28, 2007.
- Widlowski, Jean-Luc, Pinty, Bernard, Lavergne, Thomas, Verstraete, Michel M. und Gobron, Nadine: Horizontal radiation transport in 3-d forest canopies at multiple spatial resolutions: Simulated impact on canopy absorption. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 103(4):S. 379 – 397, 2006.
- Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Escobar, D.E. und Gerbermann, A.H.: Vegetation indices in crop assessments. In: *Remote Sensing of Environment*, Band 35(2-3):S. 105 – 119, 1991.
- Witzenberger, A., Hack, H. und van den Boom, T.: Erläuterungen zum bbchdezimal-code für die entwicklungsstadien des getreides – mit abbildungen. In: *Gesunde Pflanzen*, Band 41:S. 384 – 388, 1989.
- Yan, H.P., Kang, M.Z., de Reffye, P. und Dingkuhn, M.: A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. In: *Anal. of Botany*, Band 93:S. 591 – 602, 2004.
- Zhang, Y., Yu, Q., Liu, C., Jiang, J. und Zhang, X.: Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with two semiempirical approaches. In: *Agronomy Journal*, Band 96(1):S. 159 – 168, 2004.

Anhang A: Beobachtungspositionen

A.1 Beobachtungspositionen mit (Azimutwinkel, Zenitwinkel):

(0, 0);
(0, 5); (0, 10); (0, 15); (0, 20); (0, 25); (0, 30); (0, 35); (0, 40); (0, 50); (0, 60);
(15, 35); (15, 45); (15, 55);
(22,5, 65);
(30, 25); (30, 50);
(35, 55);
(45, 15); (45, 30); (45, 40); (45, 65);
(55, 55);
(60, 25); (60, 50);
(67,5, 65);
(75, 35); (75, 45); (75, 55);
(90, 5); (90, 10); (90, 15); (90, 20); (90, 25); (90, 30); (90, 35); (90, 40); (90, 50); (90, 60);
(105, 35); (105, 45); (105, 55);
(112,5, 65);
(120, 25); (120, 50);
(125, 55);
(135, 15); (135, 30); (135, 40); (135, 65);
(145, 55);
(150, 25); (150, 50);
(157,5, 65);
(165, 35); (165, 45); (165, 55);
(180, 5); (180, 10); (180, 15); (180, 20); (180, 25); (180, 30); (180, 35); (180, 40); (180, 50);
(180, 60);
(195, 35); (195, 45); (195, 55);
(202,5, 65);
(210, 25); (210, 50);
(215, 55);
(225, 15); (225, 30); (225, 40); (225, 65);
(235, 55);
(240, 25); (240, 50);
(247,5, 65);
(255, 35); (255, 45); (255, 55);
(270, 5); (270, 10); (270, 15); (270, 20); (270, 25); (270, 30); (270, 35); (270, 40); (270, 50);
(270, 60);
(285, 35); (285, 45); (285, 55);
(292,5, 65);
(300, 25); (300, 50);
(305, 55);
(315, 15); (315, 30); (315, 40); (315, 65);
(325, 55);
(330, 25); (330, 50);
(337,5, 65);
(345, 35); (345, 45); (345, 55);

Anhang B: Datenvisualisierung

B.1 BRDF von Beständen unterschiedlicher Getreidearten und Wachstumsstadien

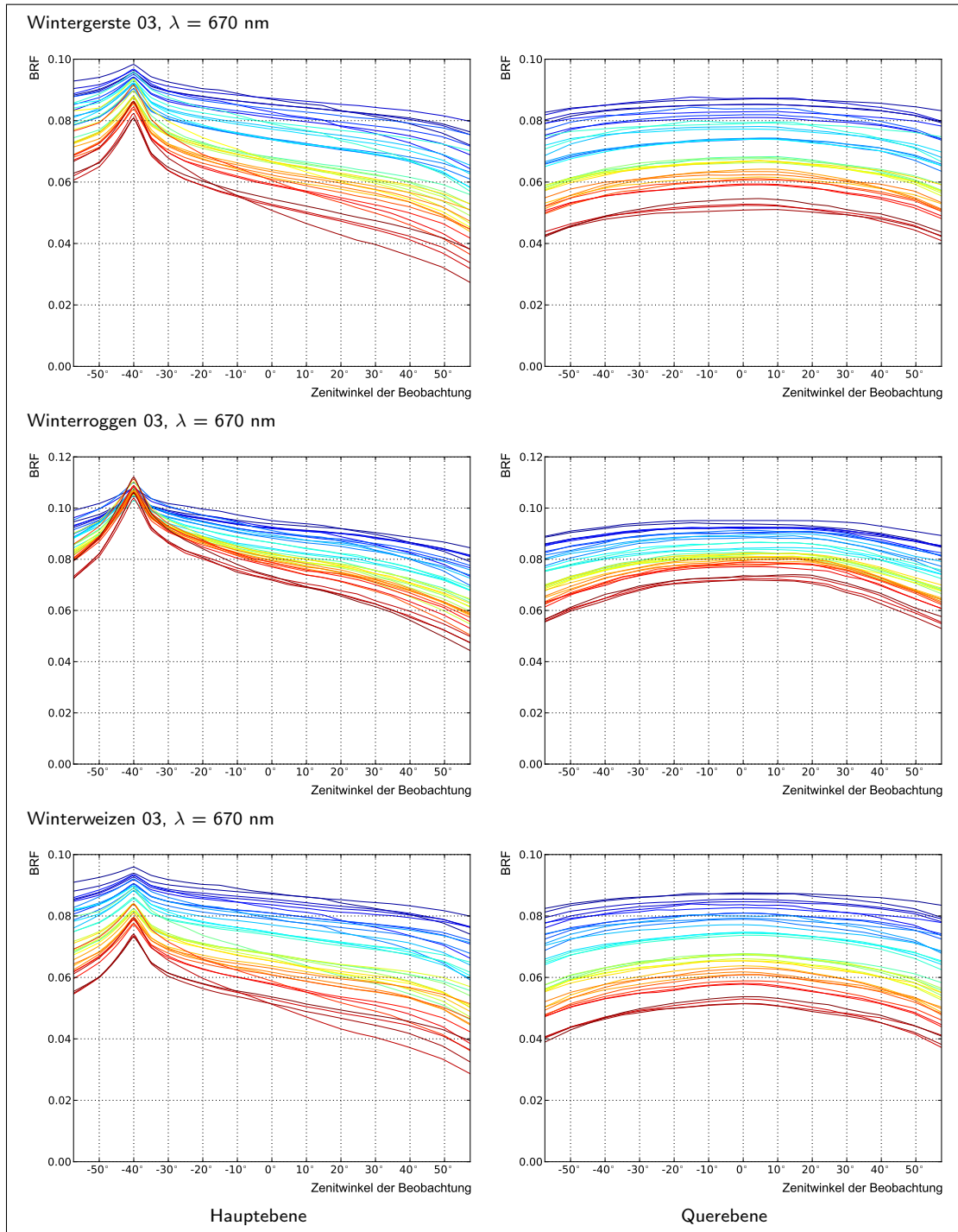


Abb. B.1 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB03, WR03 und WW03. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

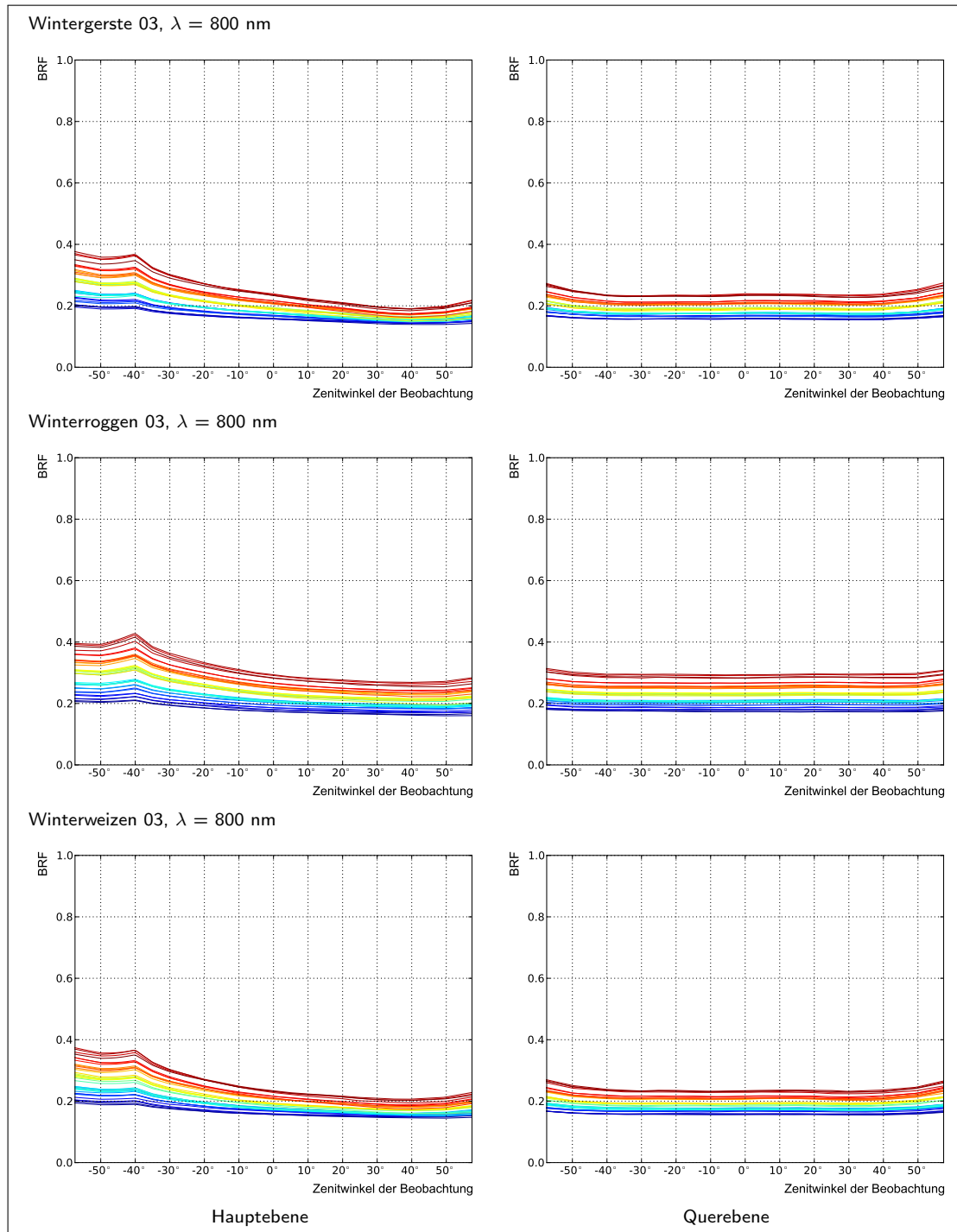


Abb. B.2 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB03, WR03 und WW03. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

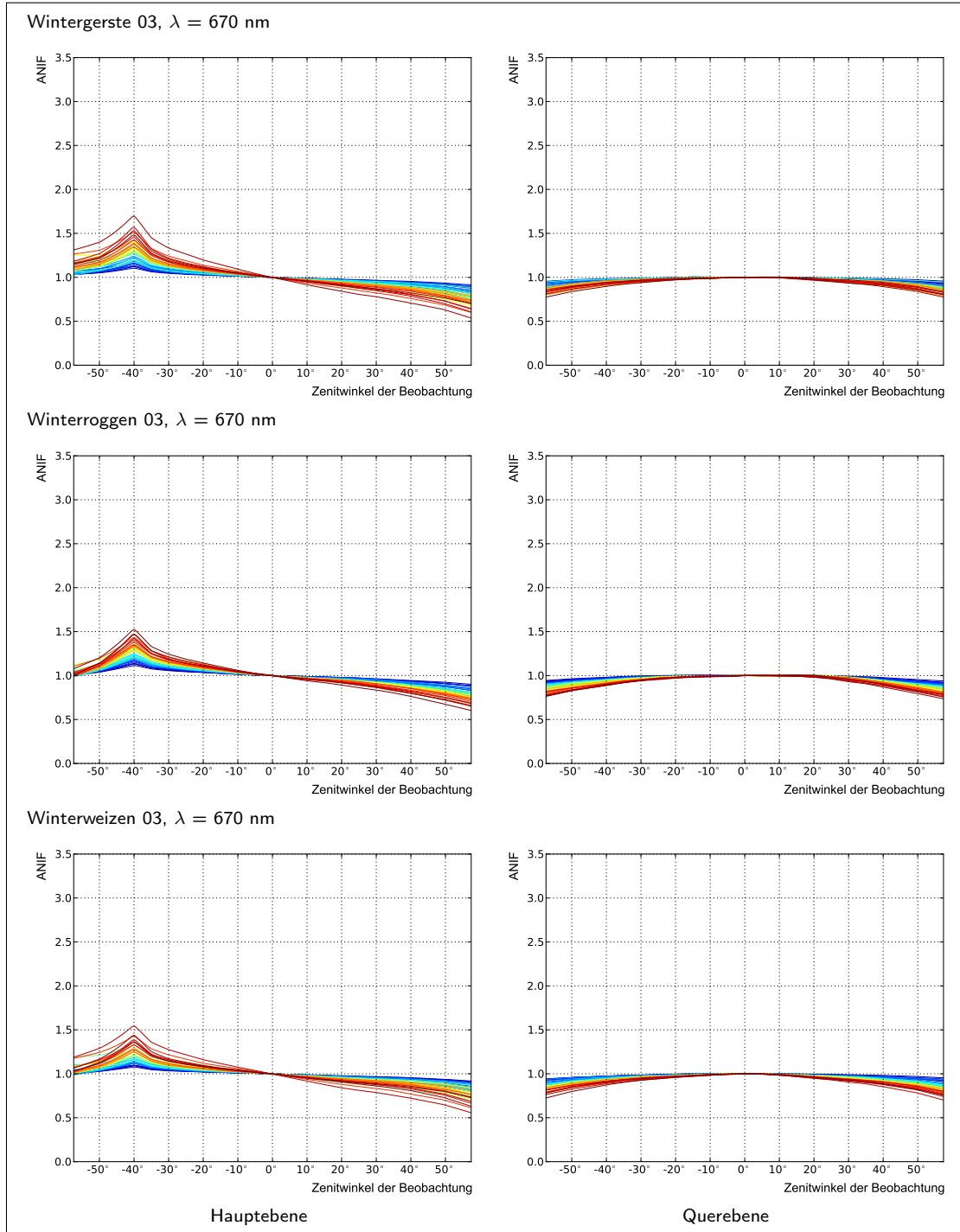


Abb. B.3 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Haupte-ebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB03, WR03 und WW03. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

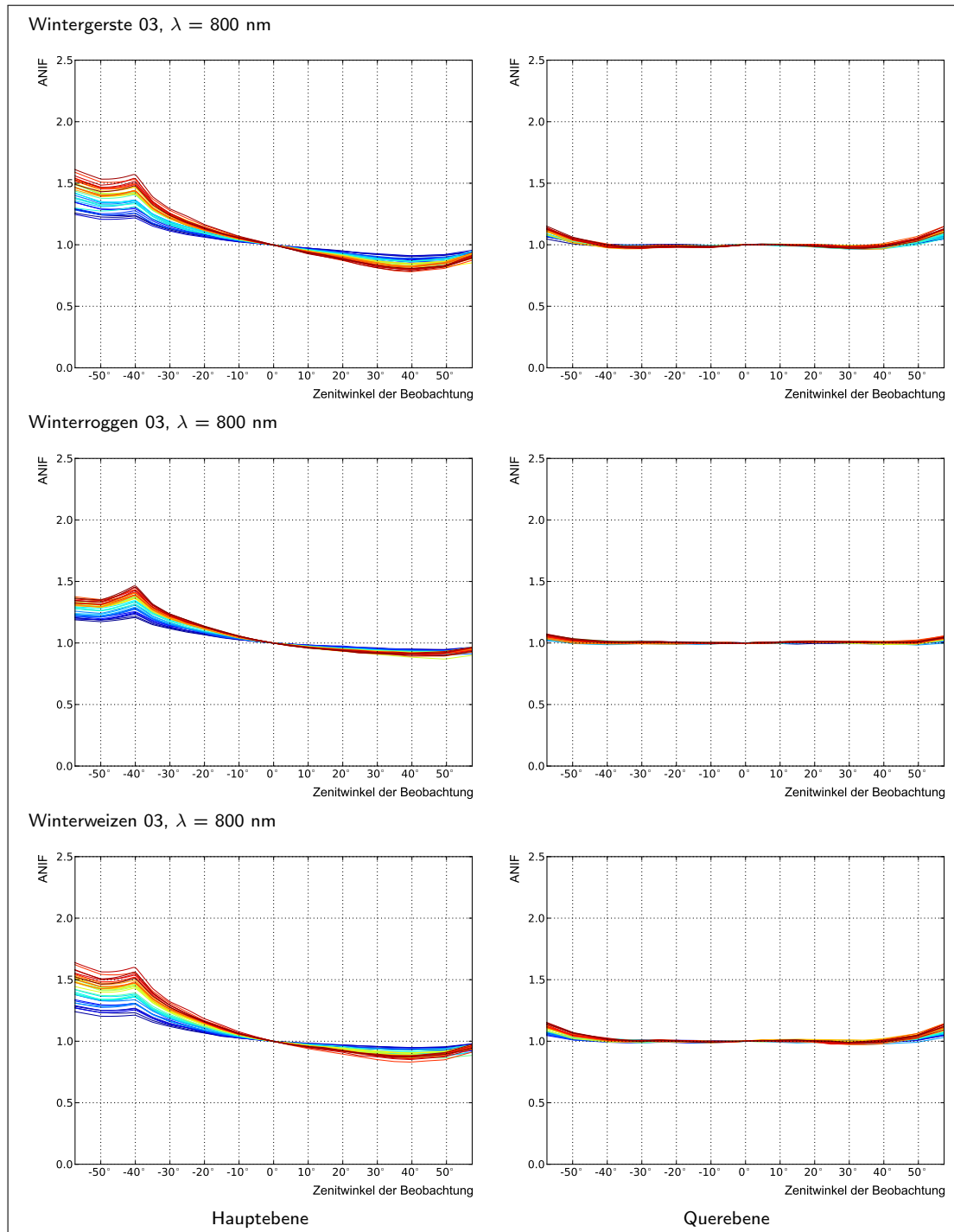


Abb. B.4 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB03, WR03 und WW03. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

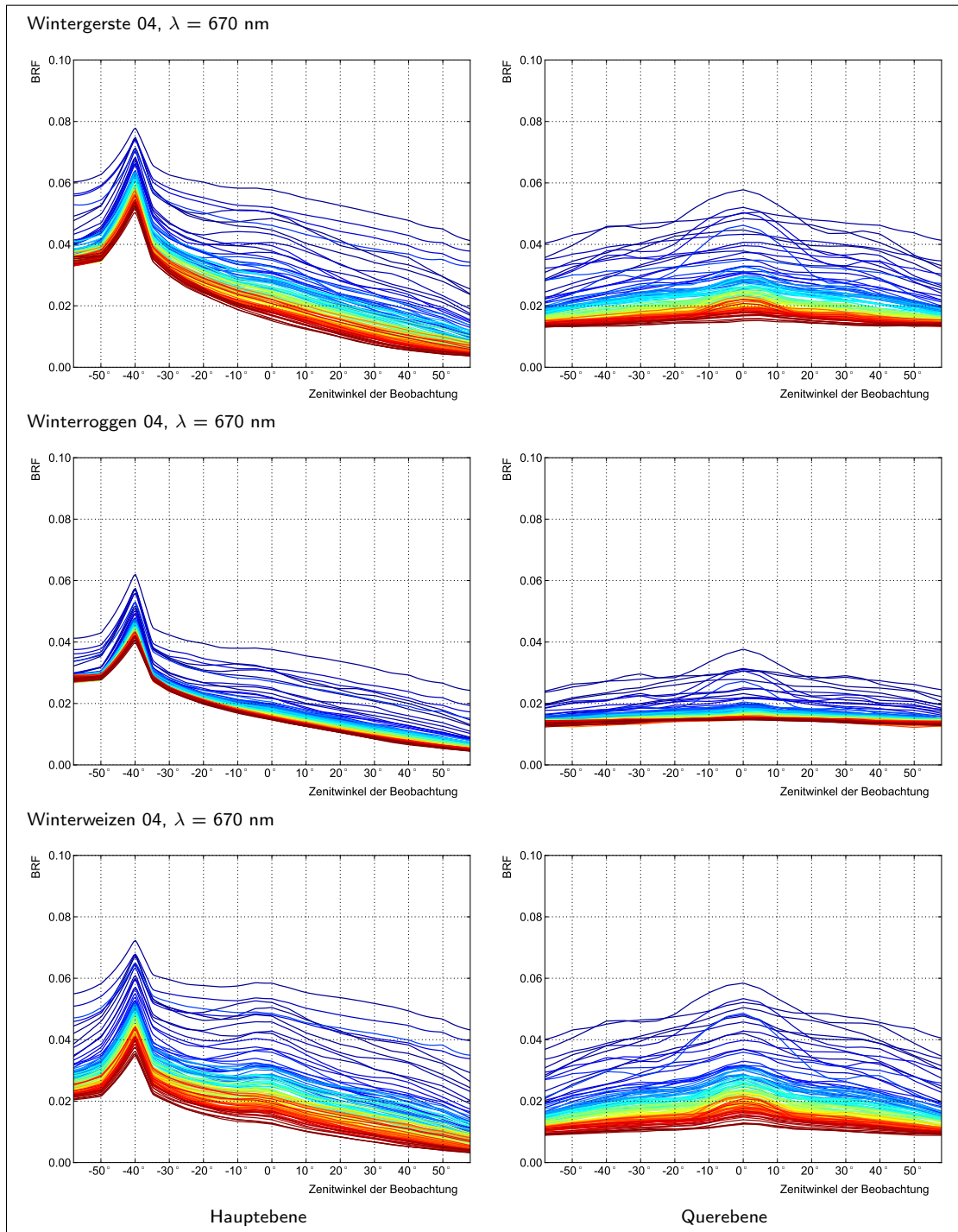


Abb. B.5 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB04, WR04 und WW04. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

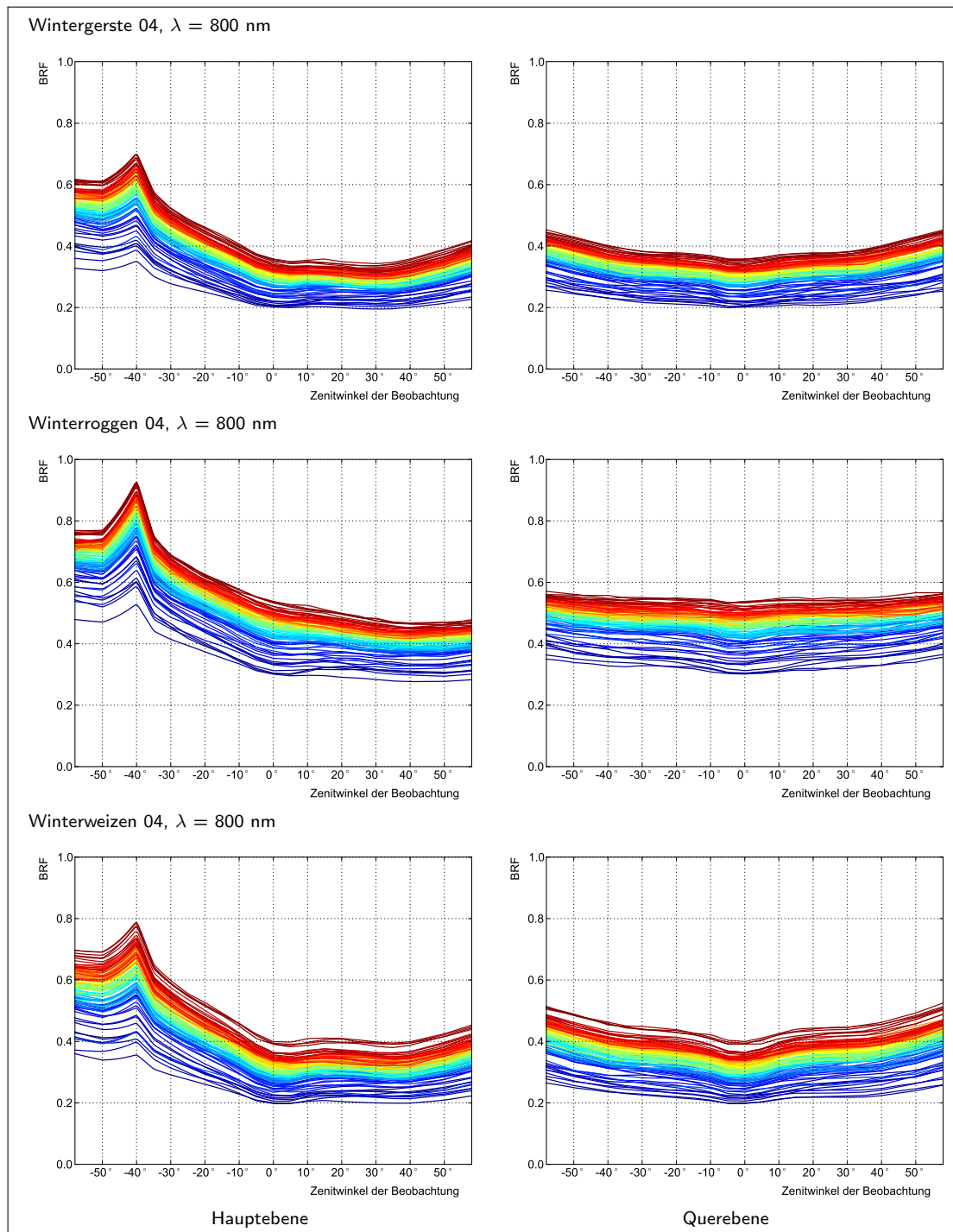


Abb. B.6 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB04, WR04 und WW04. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

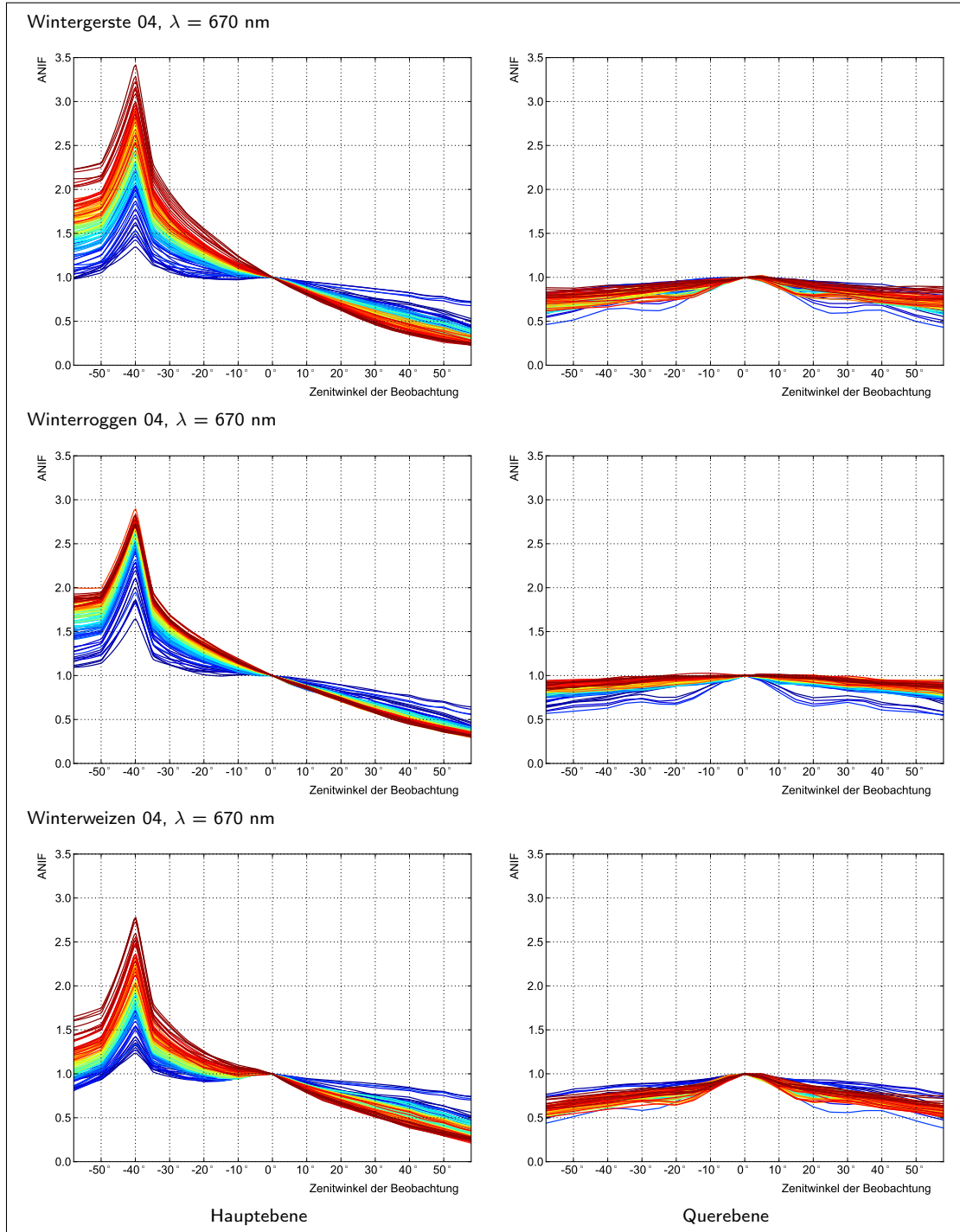


Abb. B.7 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB04, WR04 und WW04. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

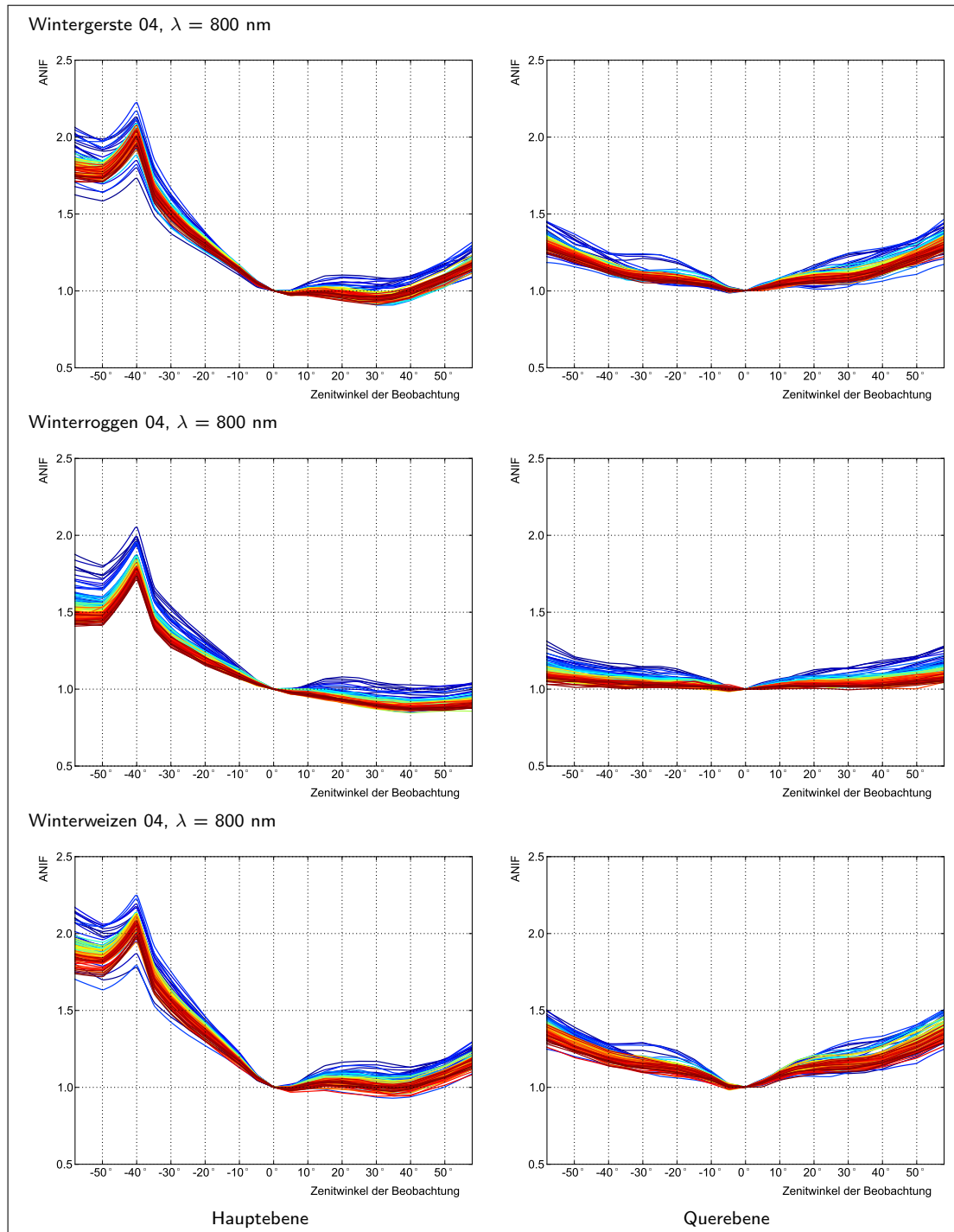


Abb. B.8 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB04, WR04 und WW04. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

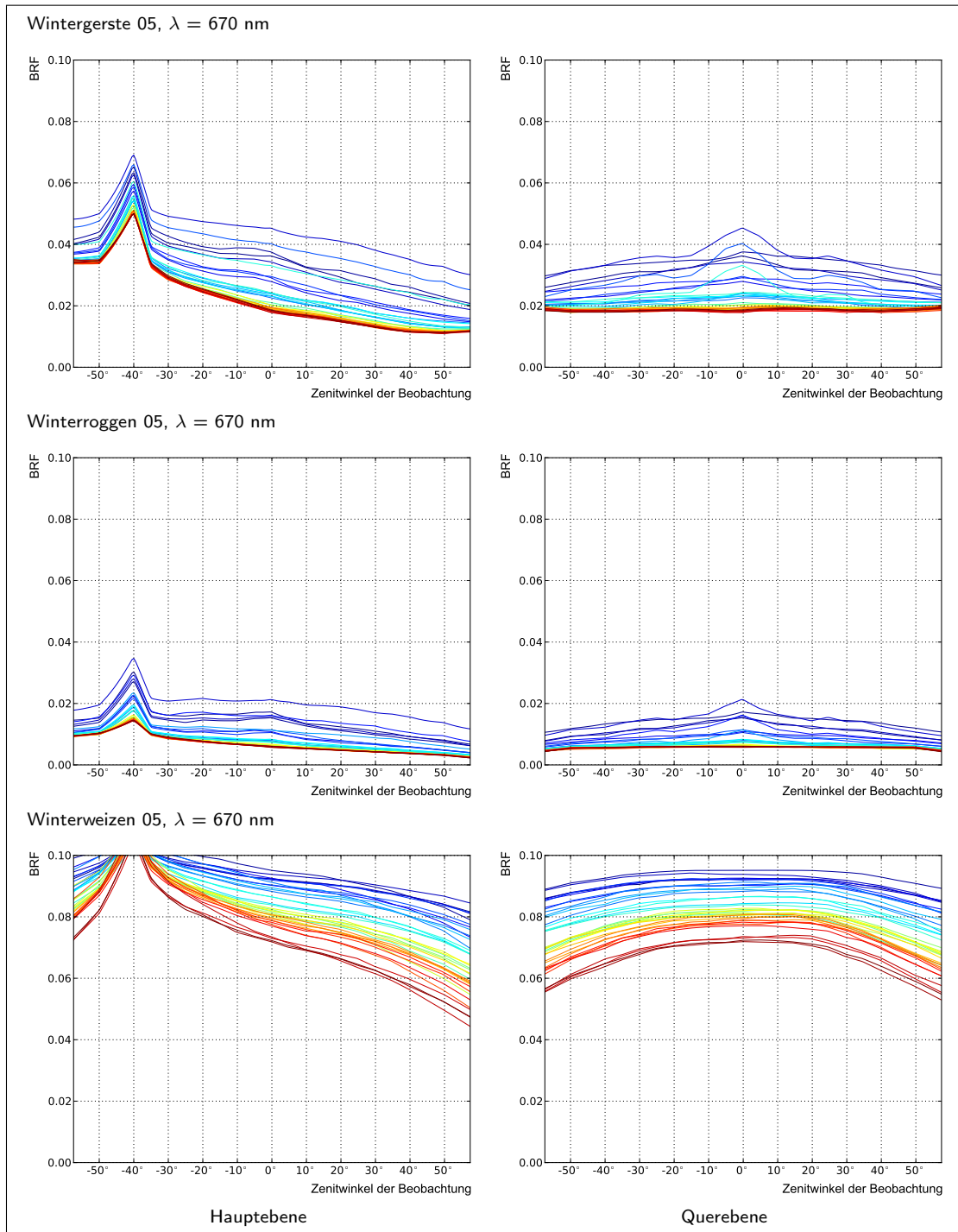


Abb. B.9 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB05, WR05 und WW05. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

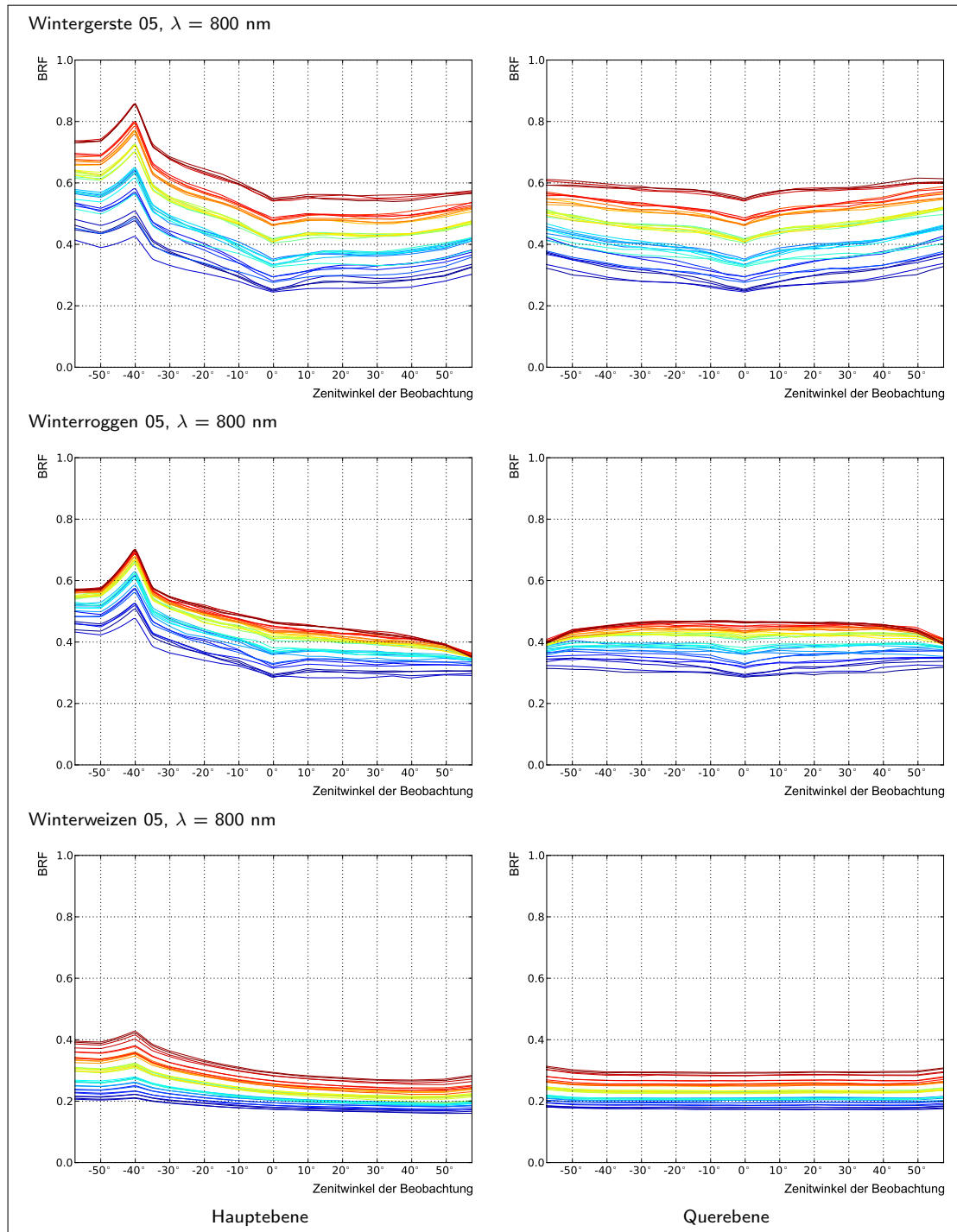


Abb. B.10 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB05, WR05 und WW05. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

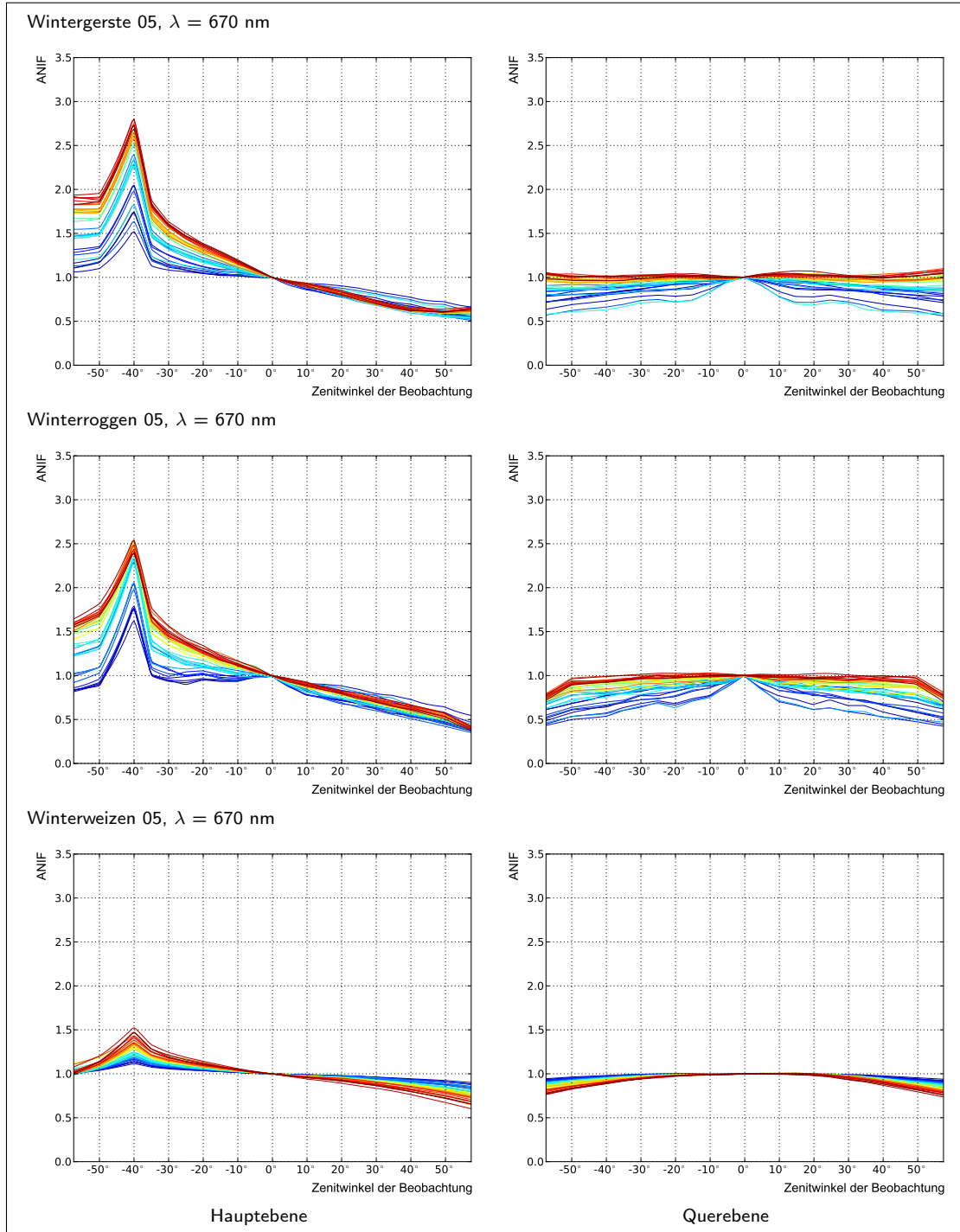


Abb. B.11 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Haupte-ebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB05, WR05 und WW05. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

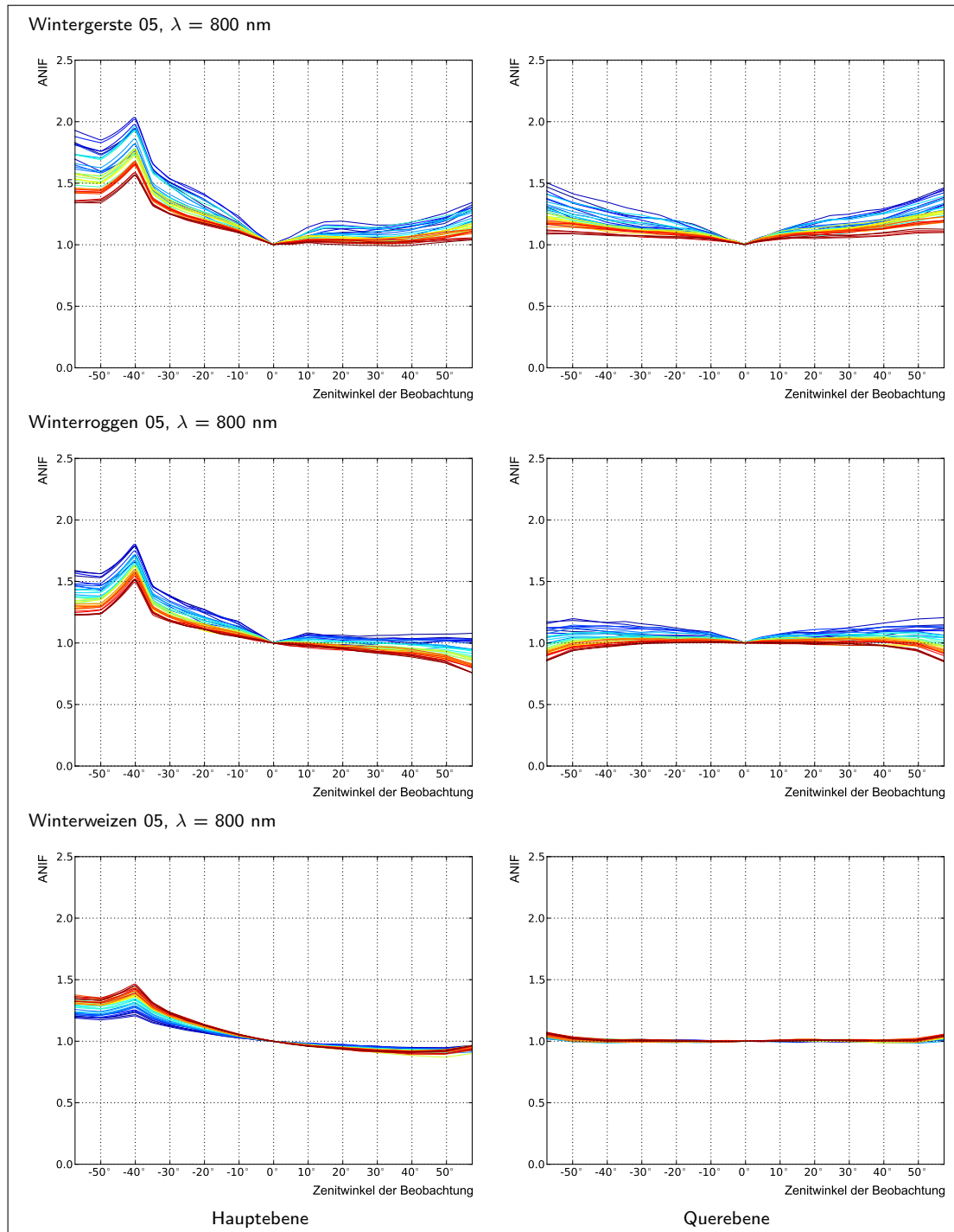


Abb. B.12 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB05, WR05 und WW05. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

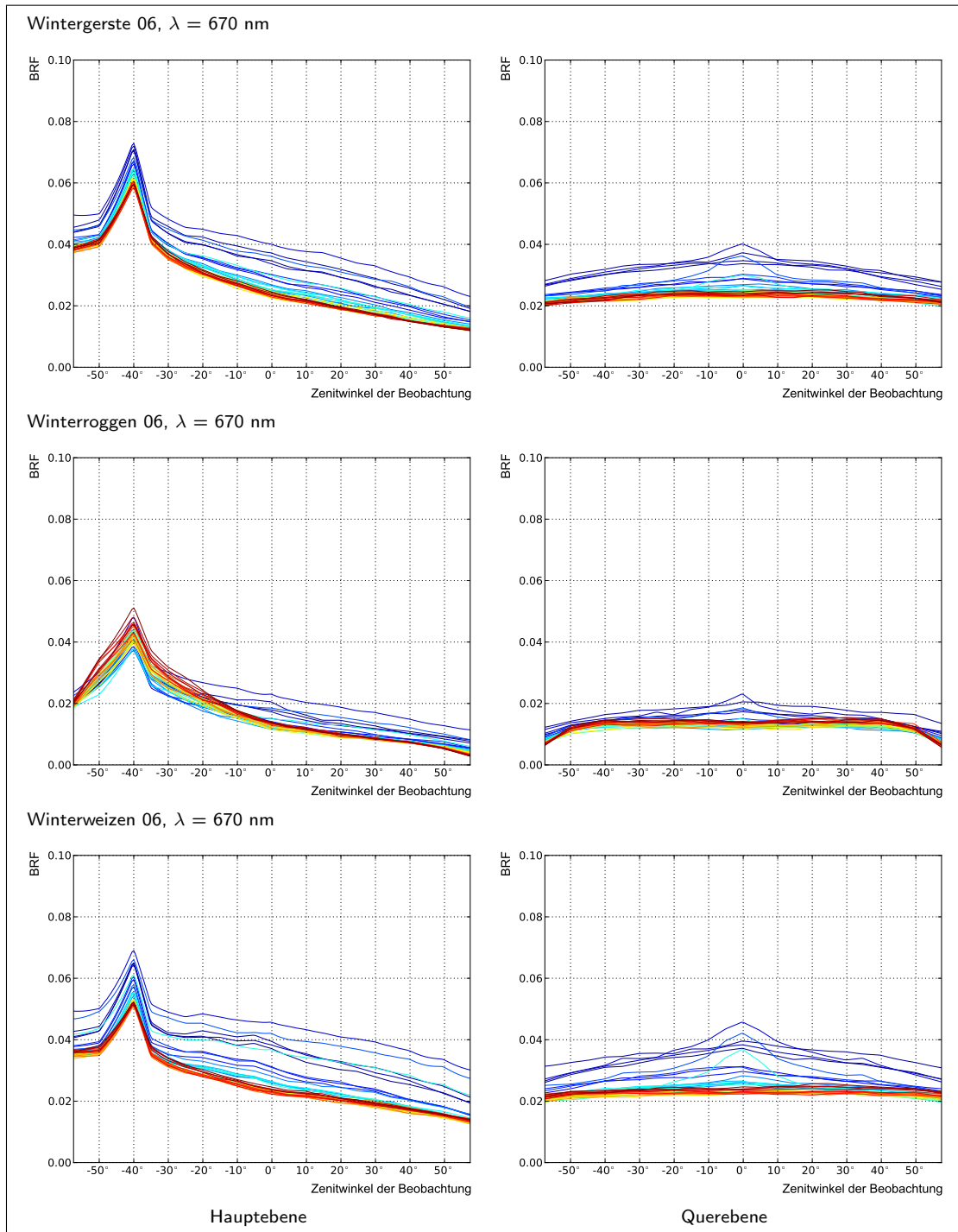


Abb. B.13 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB06, WR06 und WW06. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

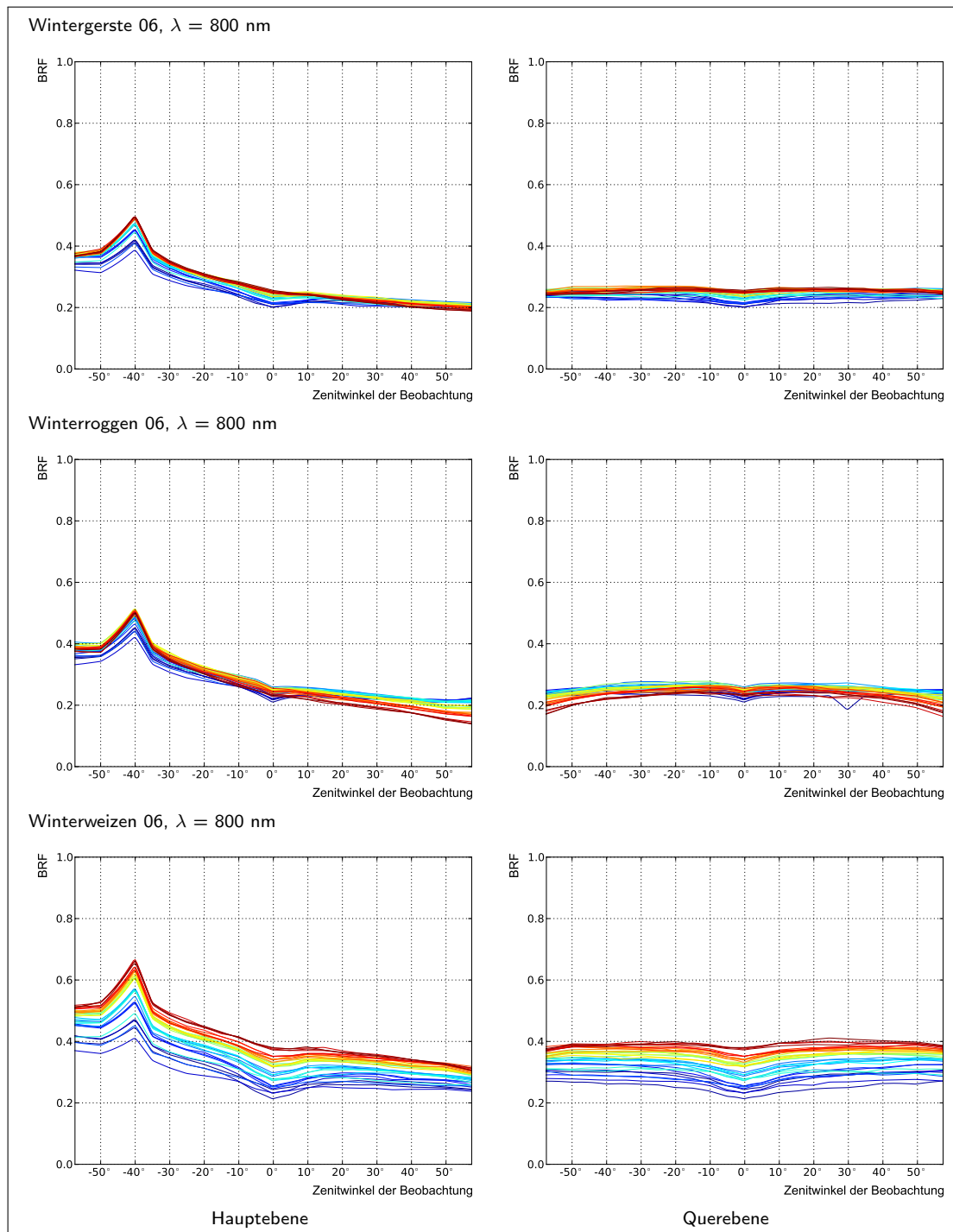


Abb. B.14 – Querschnitt durch die BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB06, WR06 und WW06. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

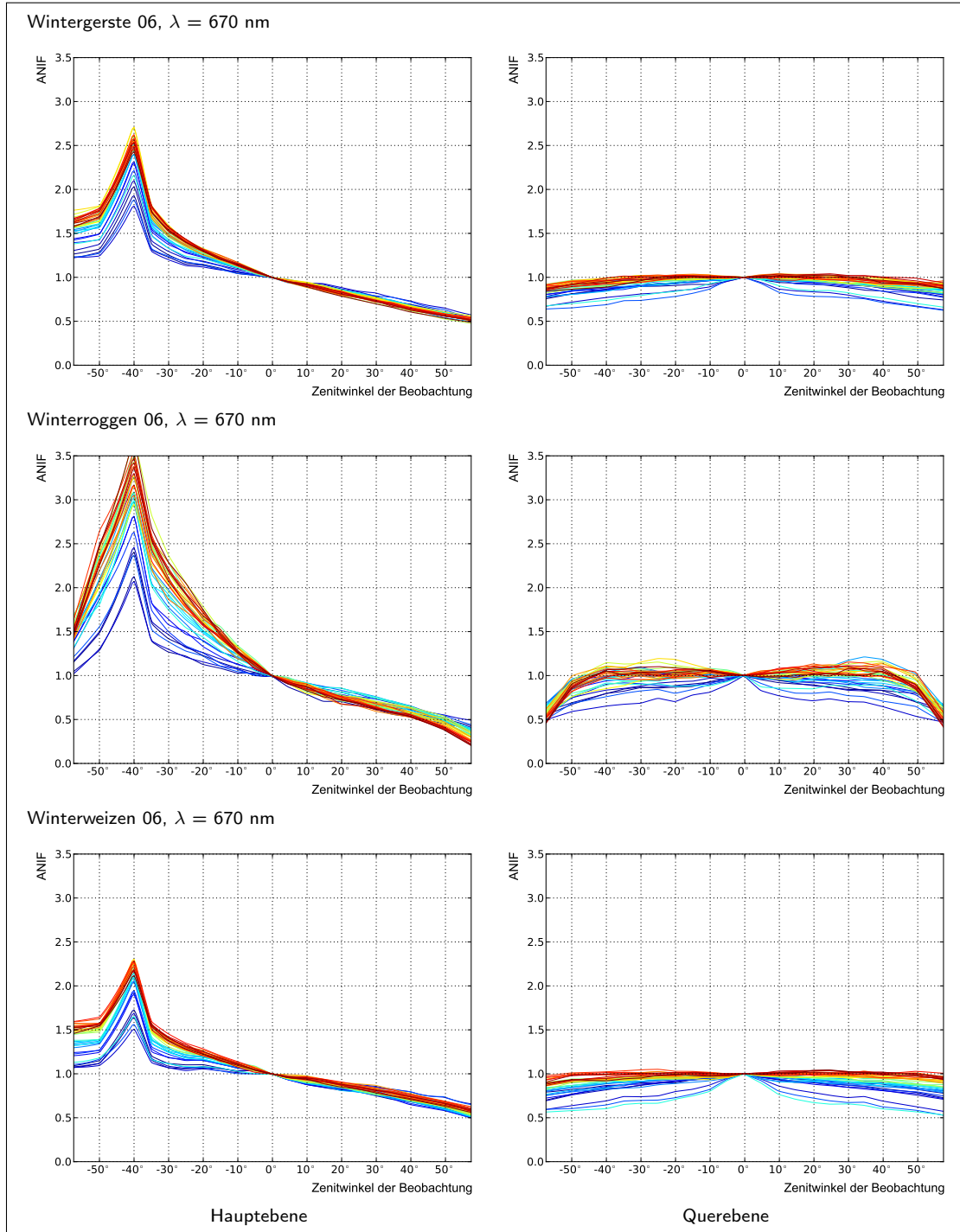


Abb. B.15 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm entlang der Haupte-ebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB06, WR06 und WW06. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

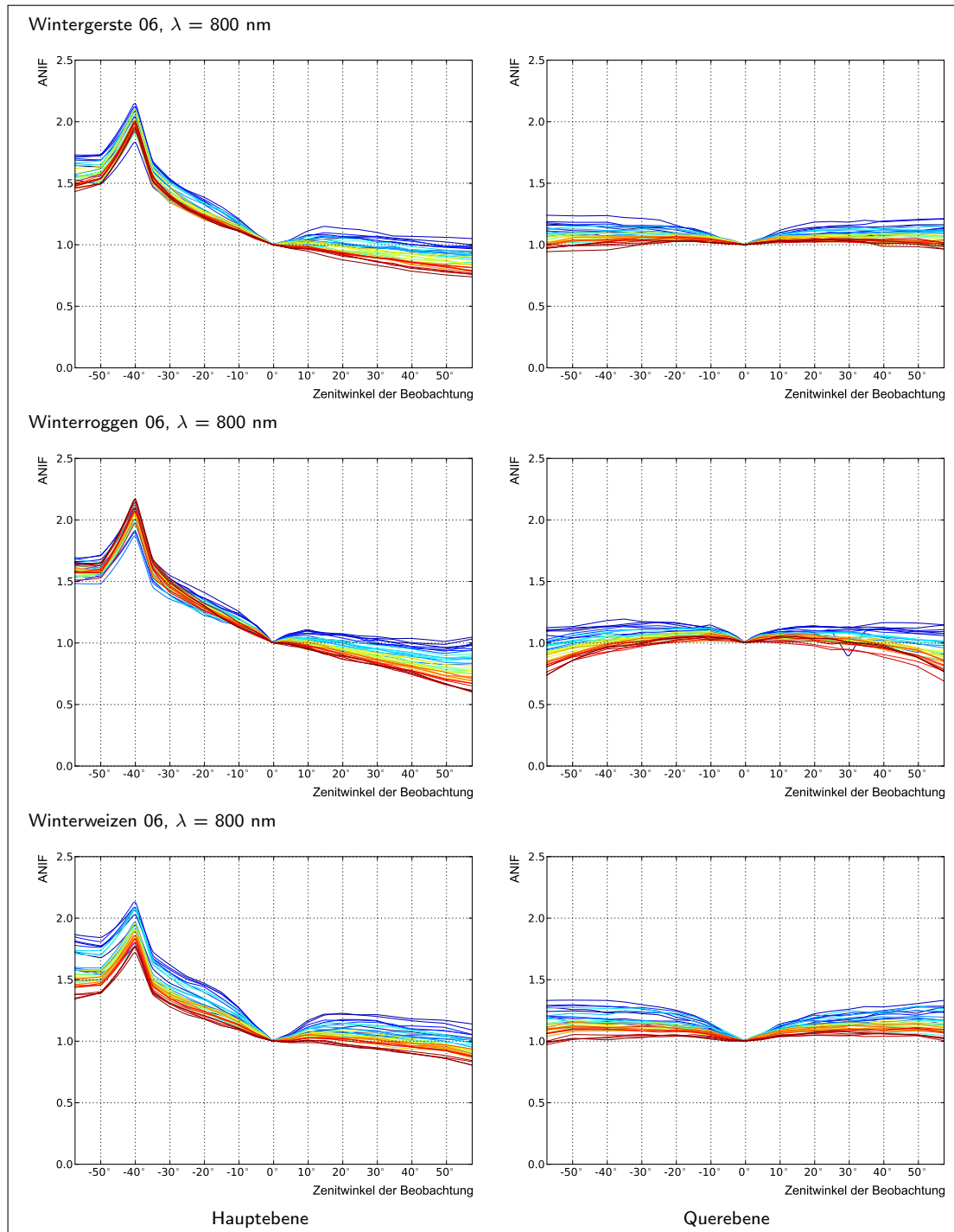


Abb. B.16 – Querschnitt durch die ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm entlang der Hauptebene und entlang der Querebene aller simulierten Bestände von WB06, WR06 und WW06. Jede Kurve repräsentiert einen bestimmten Bestand. Die Kurven der Bestände sind nach ihrem LAI sortiert, dem Farbverlauf folgend von niedrigen Werten (blau) aufsteigend zu hohen Werten (rot).

B.2 BRDF von Beständen unterschiedlicher Bestandsstrukturmerkmale im Wachstumsstadium 04

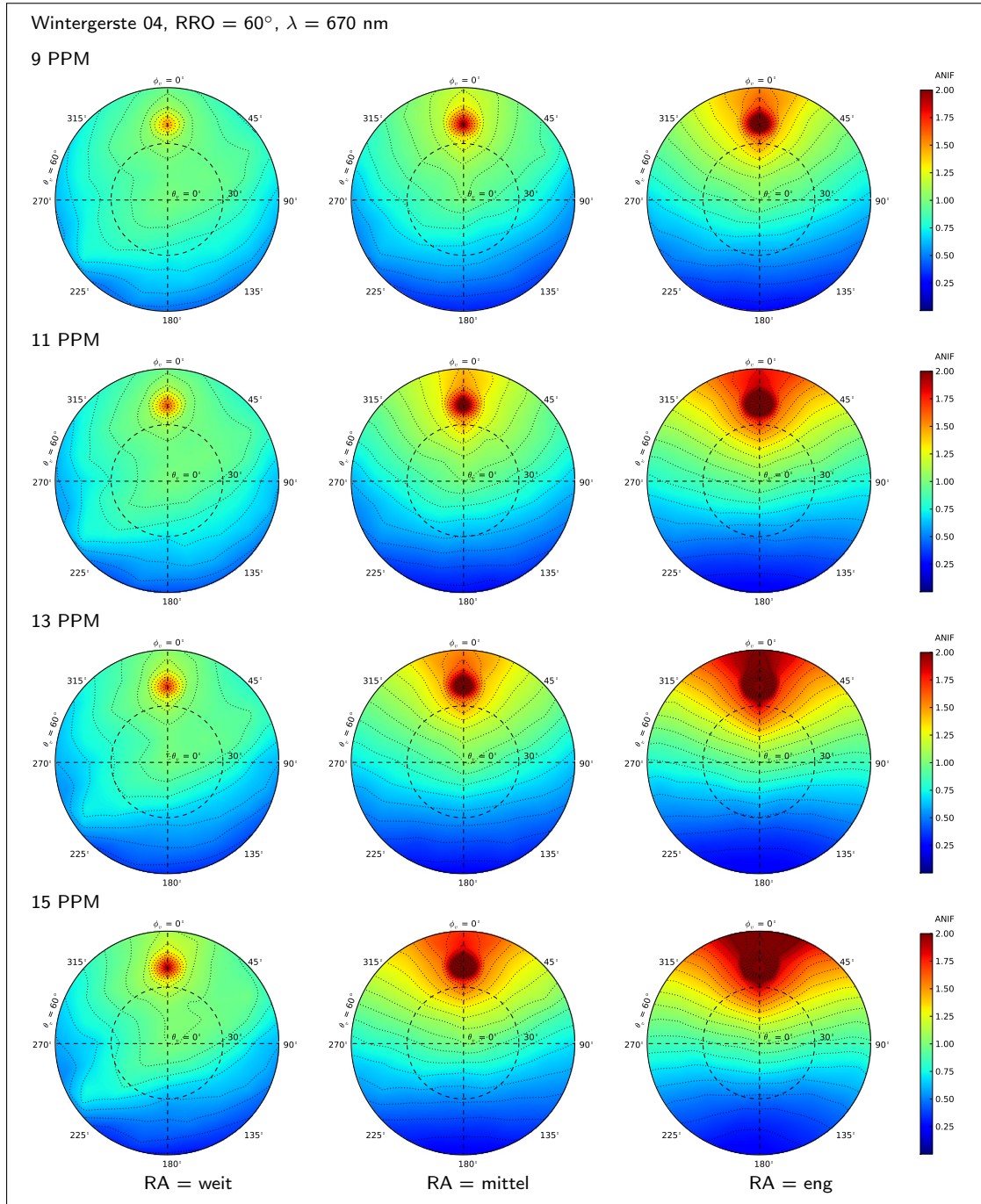


Abb. B.17 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

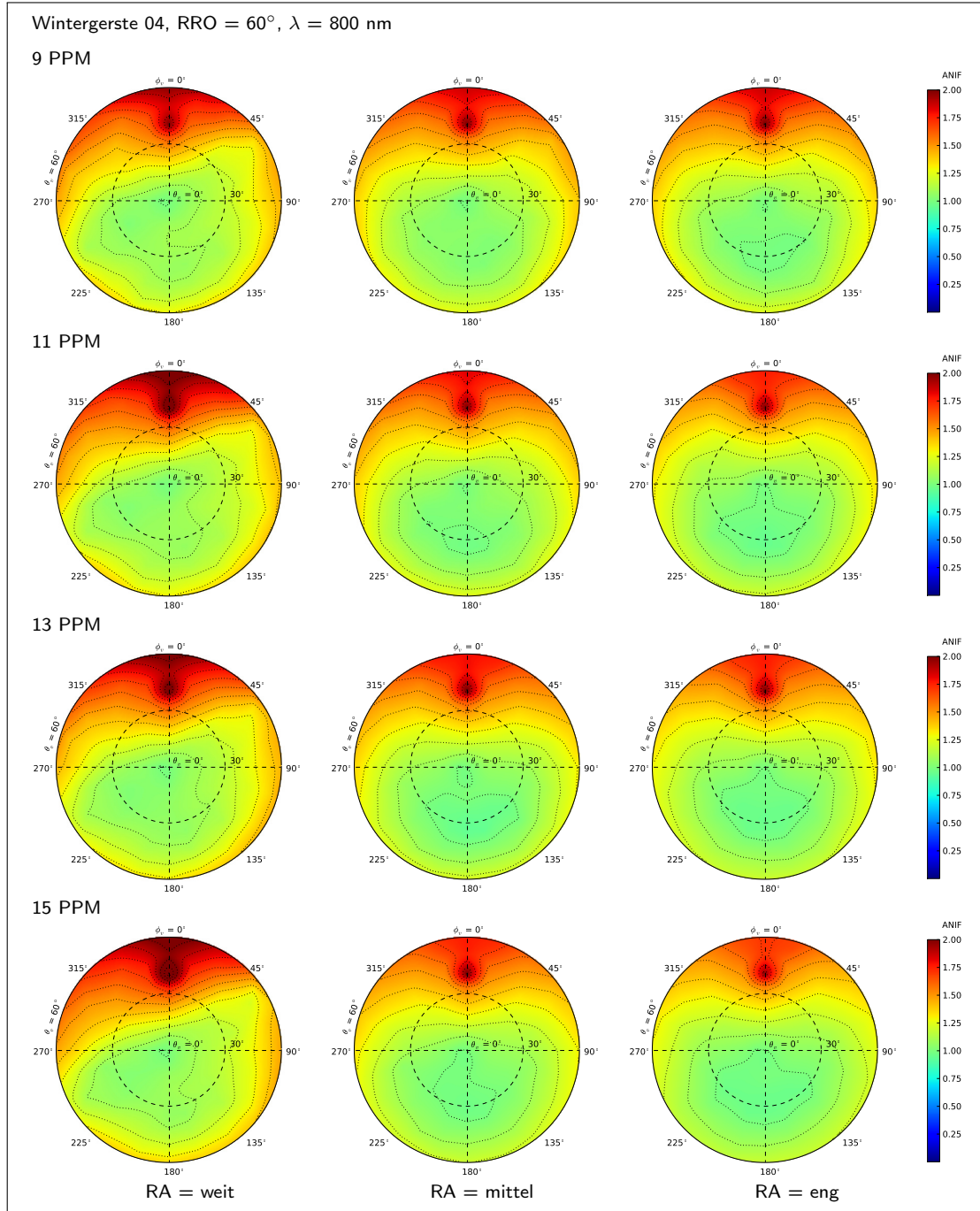


Abb. B.18 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit RRO = 60° , mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

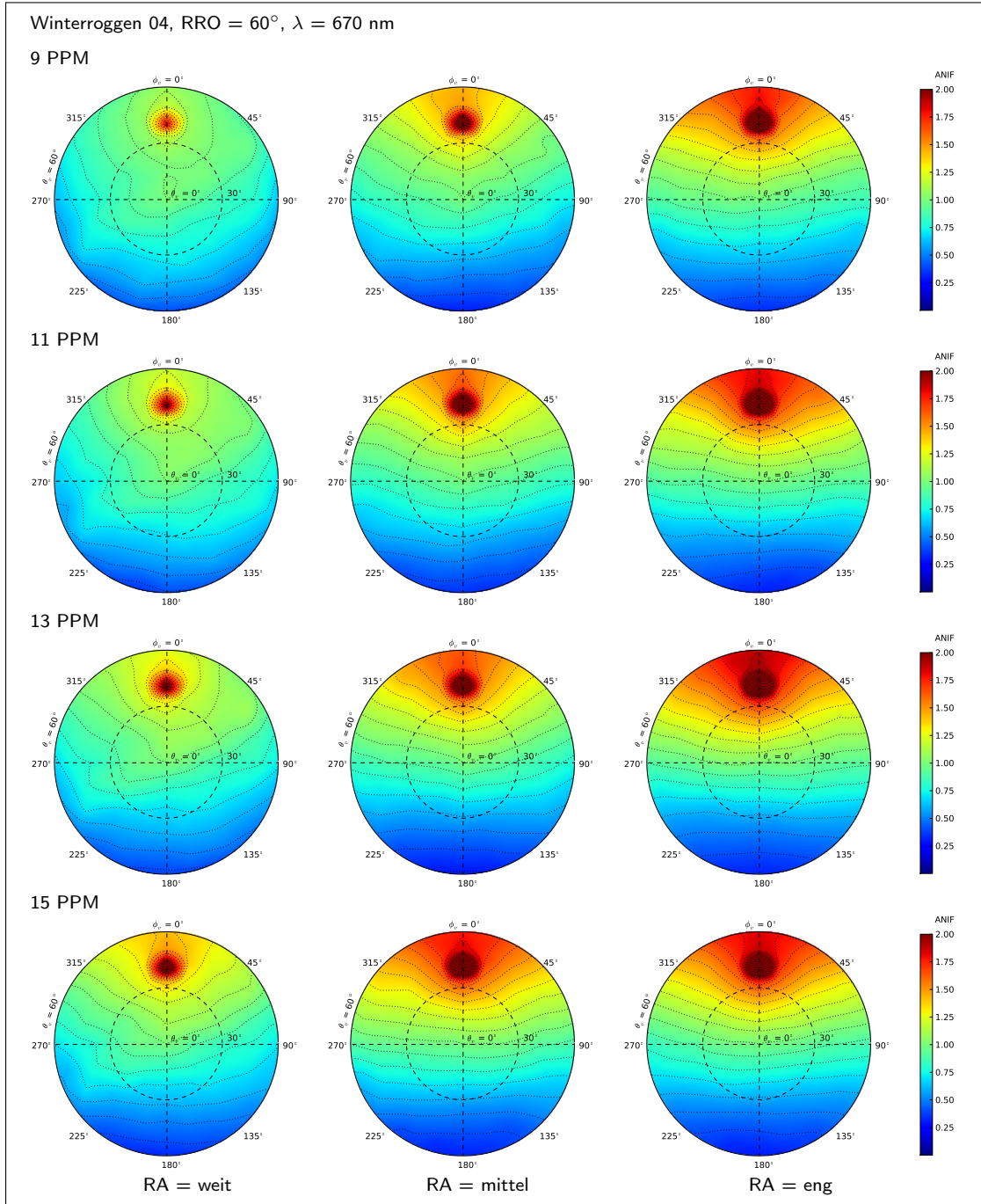


Abb. B.19 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WR04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

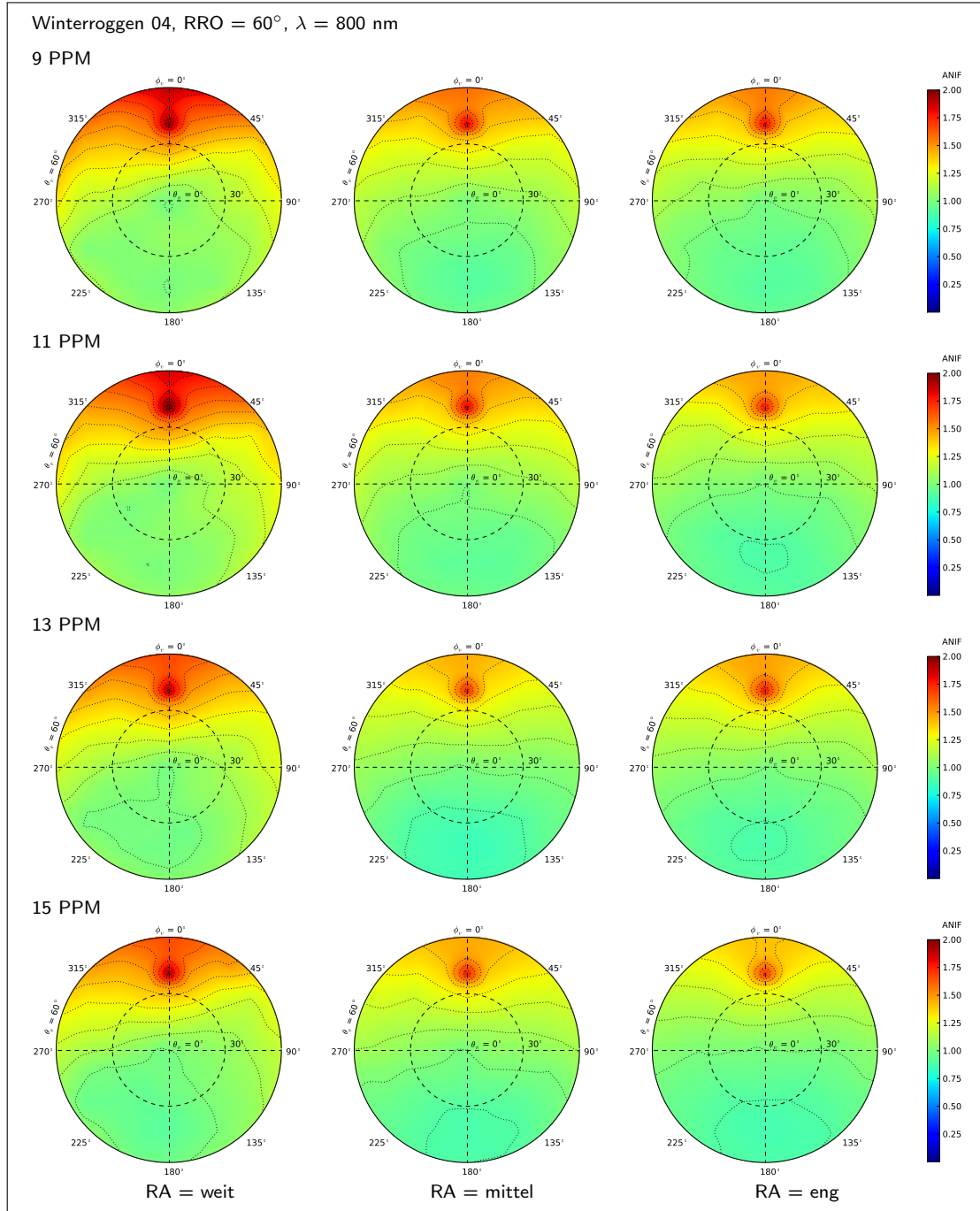


Abb. B.20 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WR04-Bestände mit RRO = 60° , mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

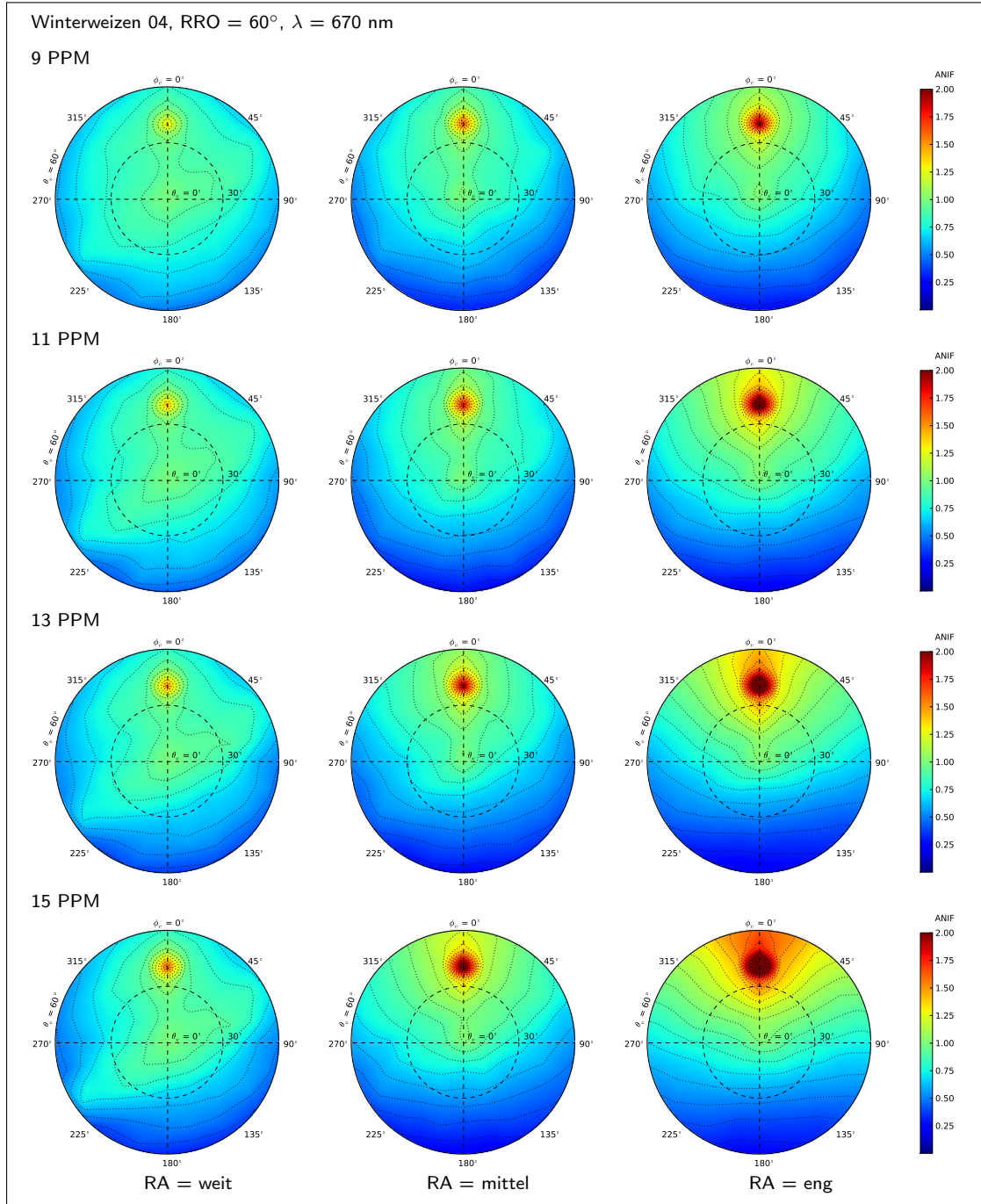


Abb. B.21 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WW04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

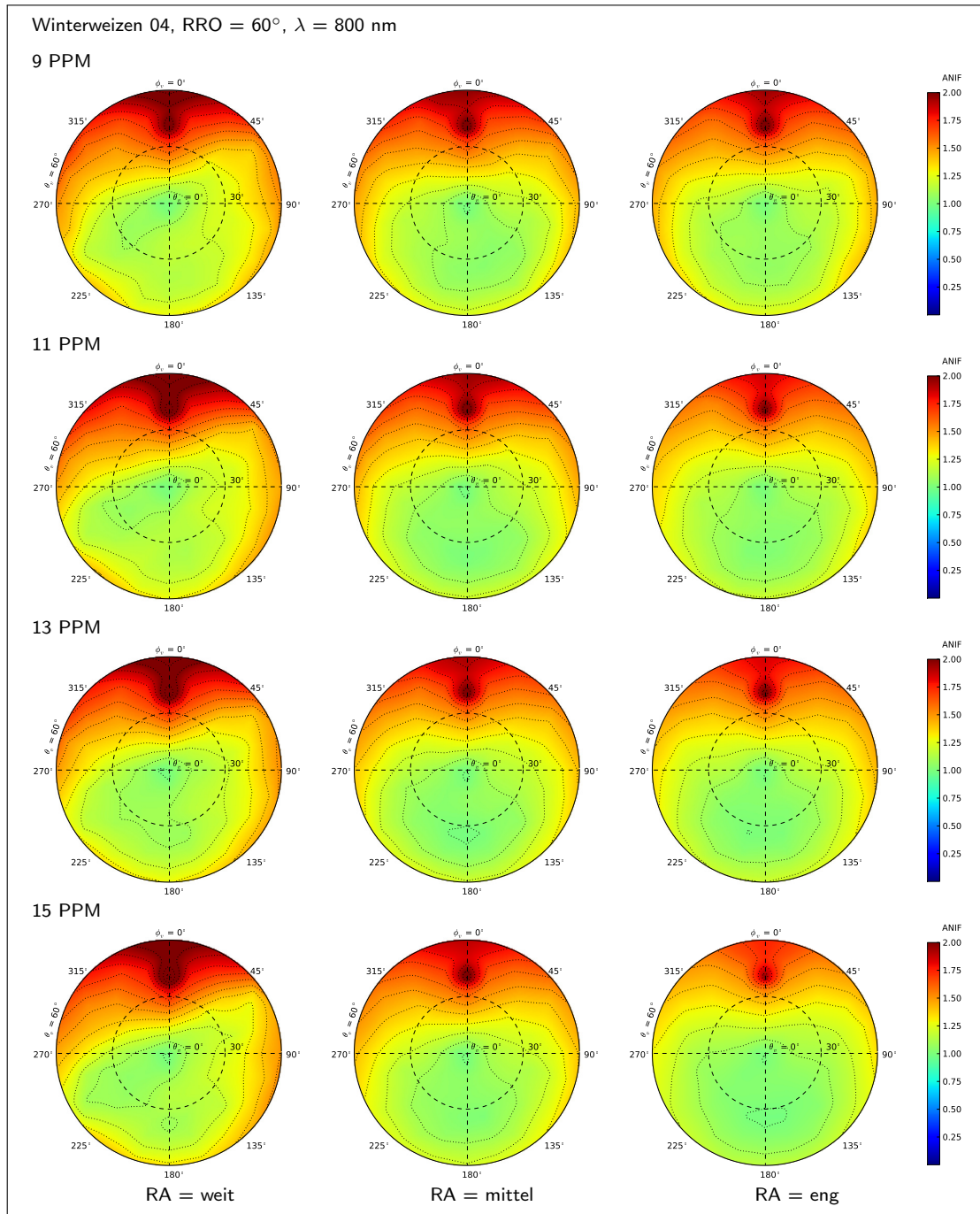


Abb. B.22 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WW04-Bestände mit RRO = 60° , mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

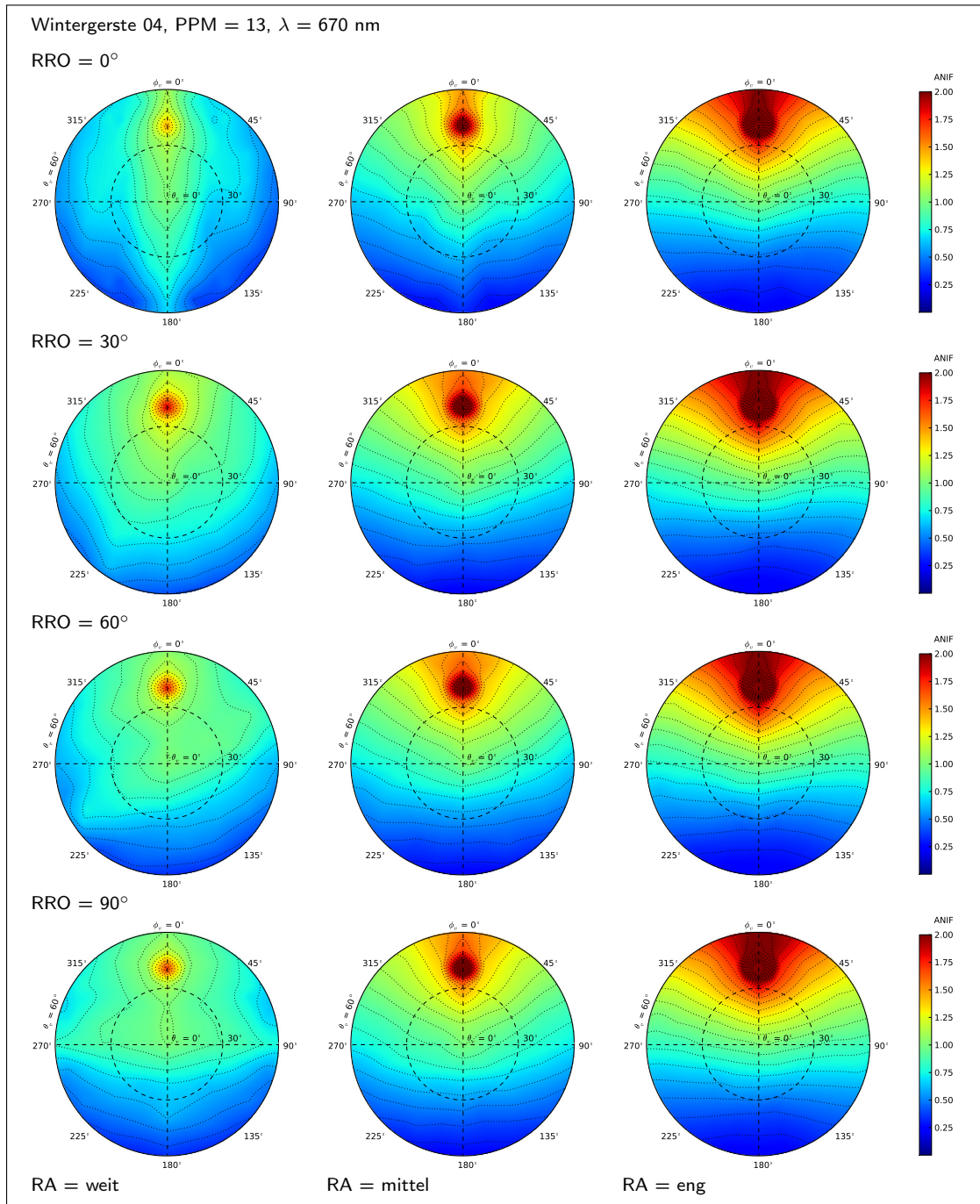


Abb. B.23 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

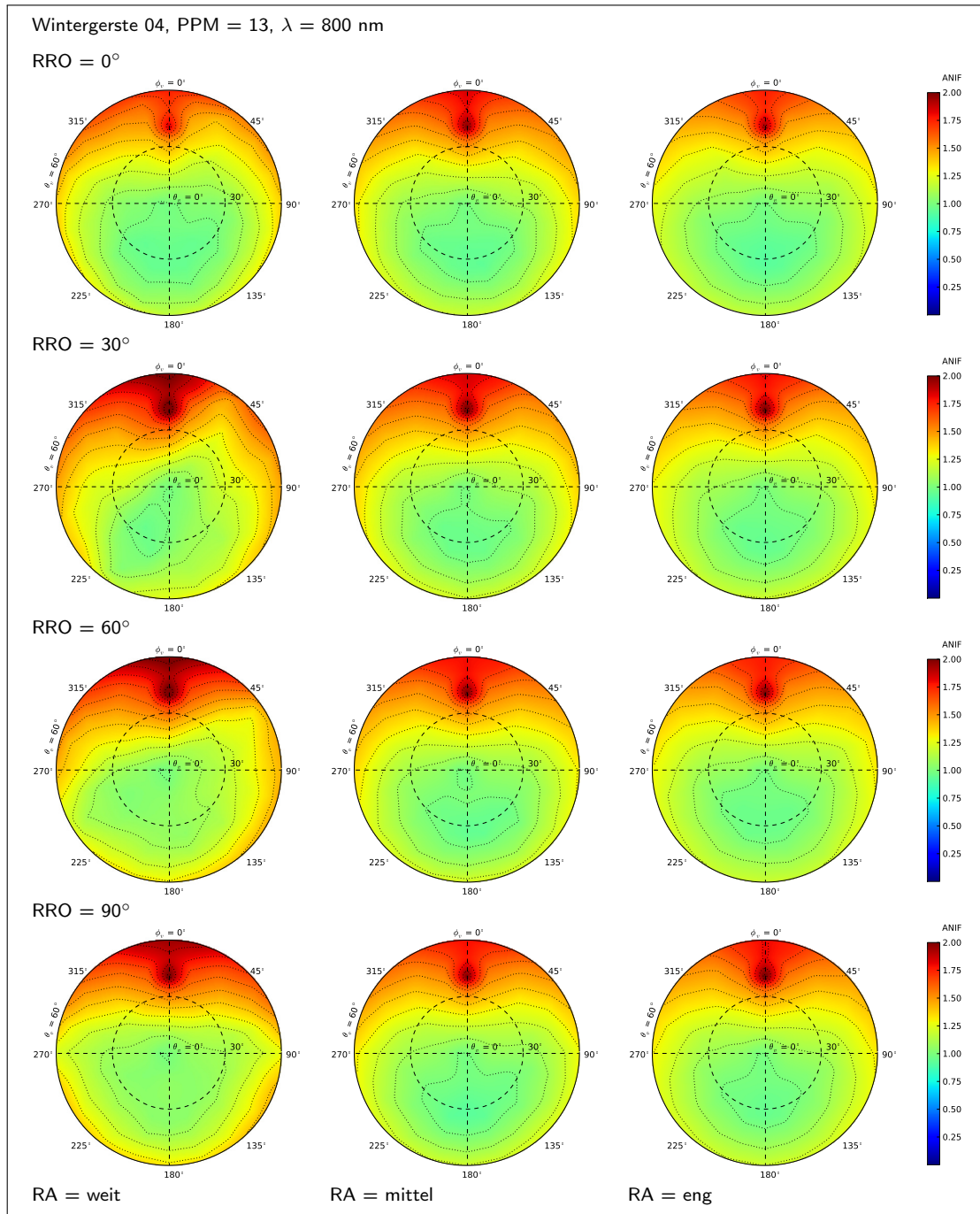


Abb. B.24 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

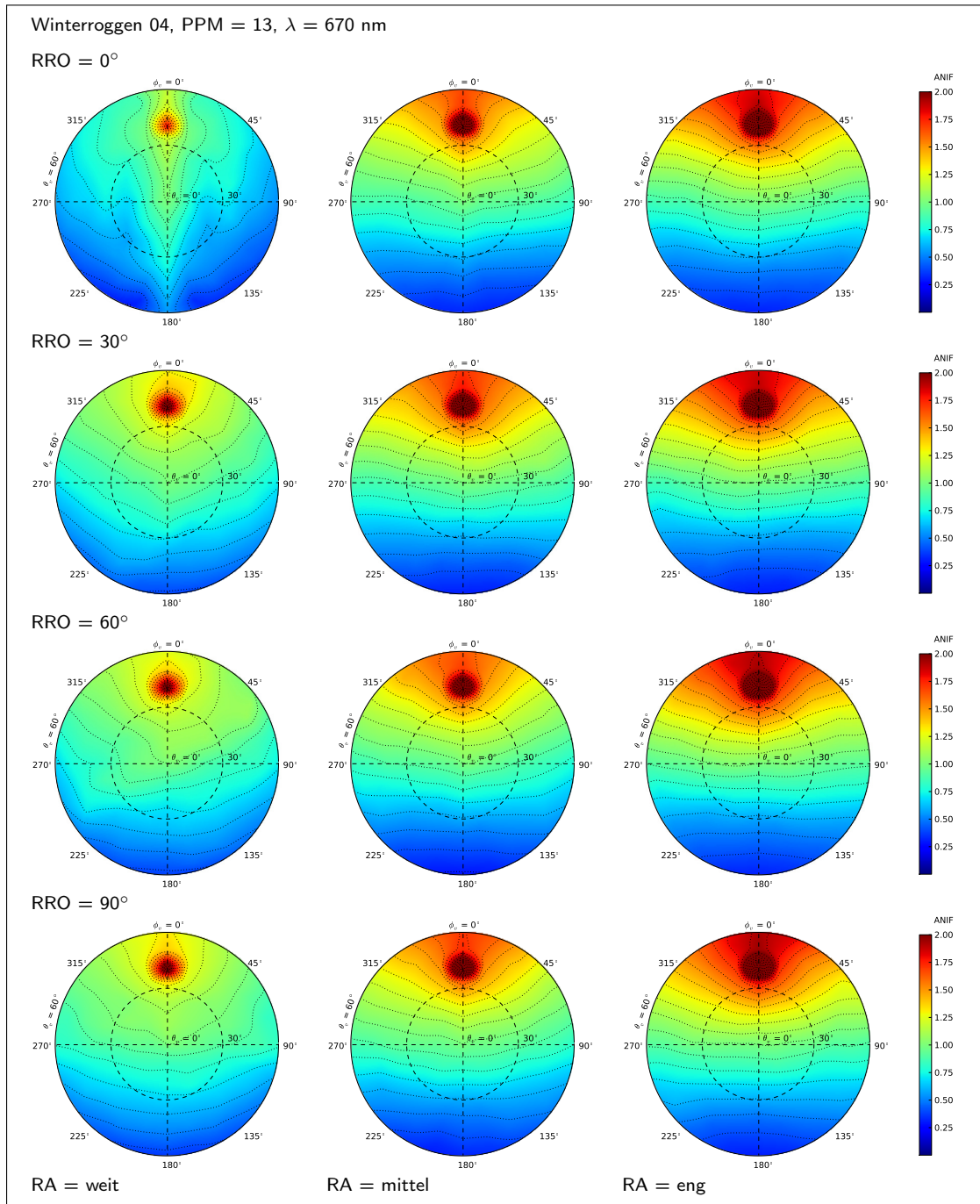


Abb. B.25 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WR04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

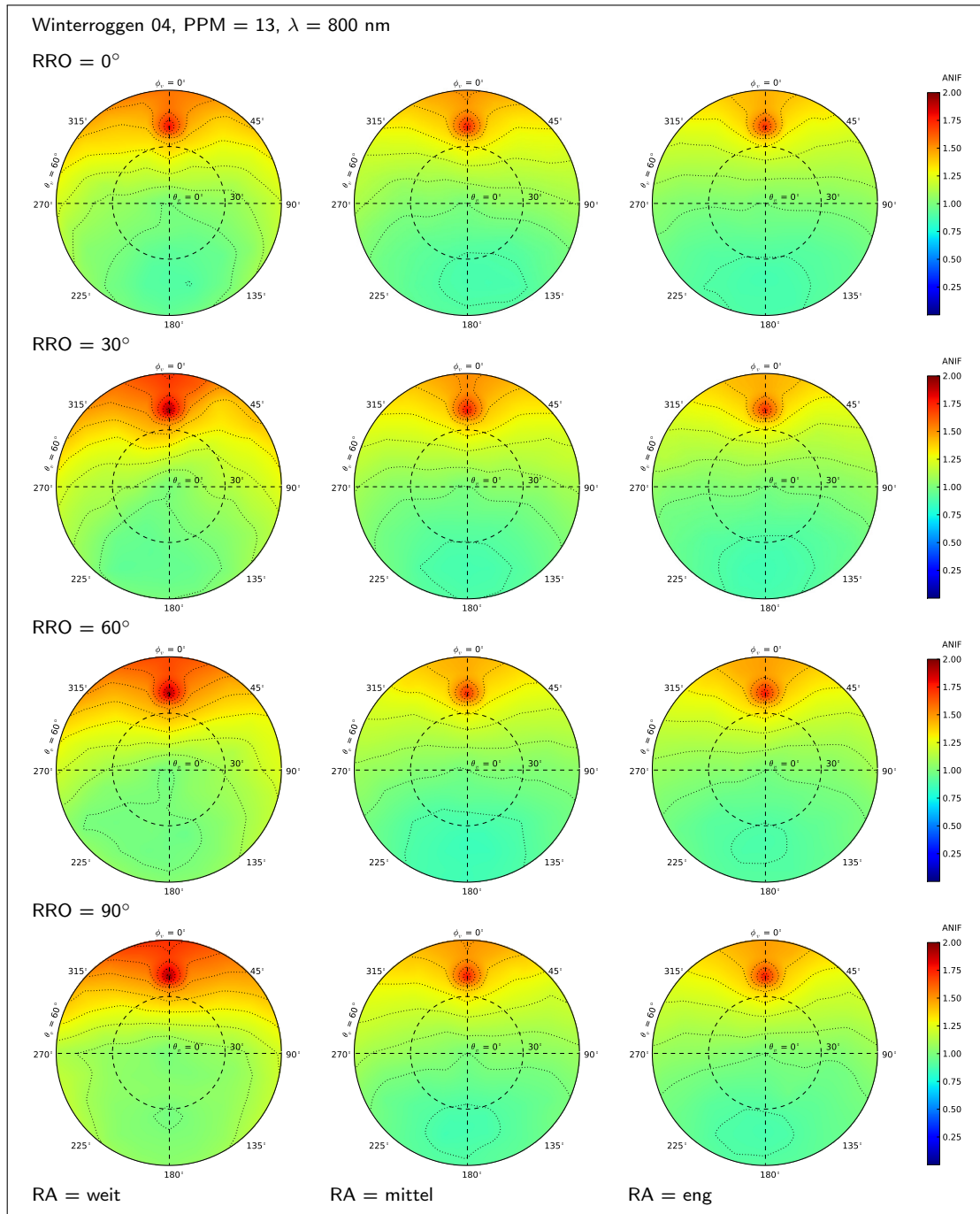


Abb. B.26 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800 \text{ nm}$ für WR04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

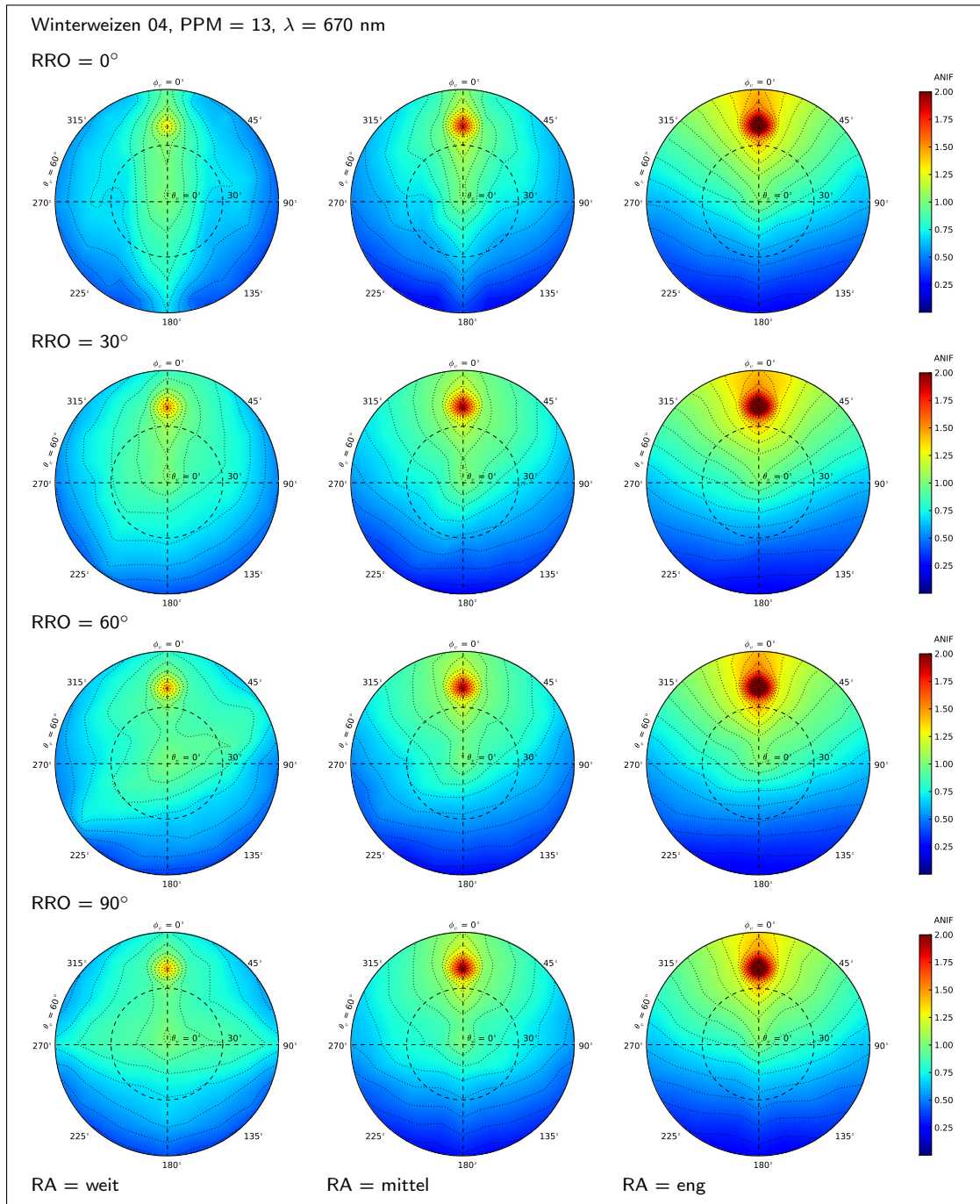


Abb. B.27 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 670$ nm für WW04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

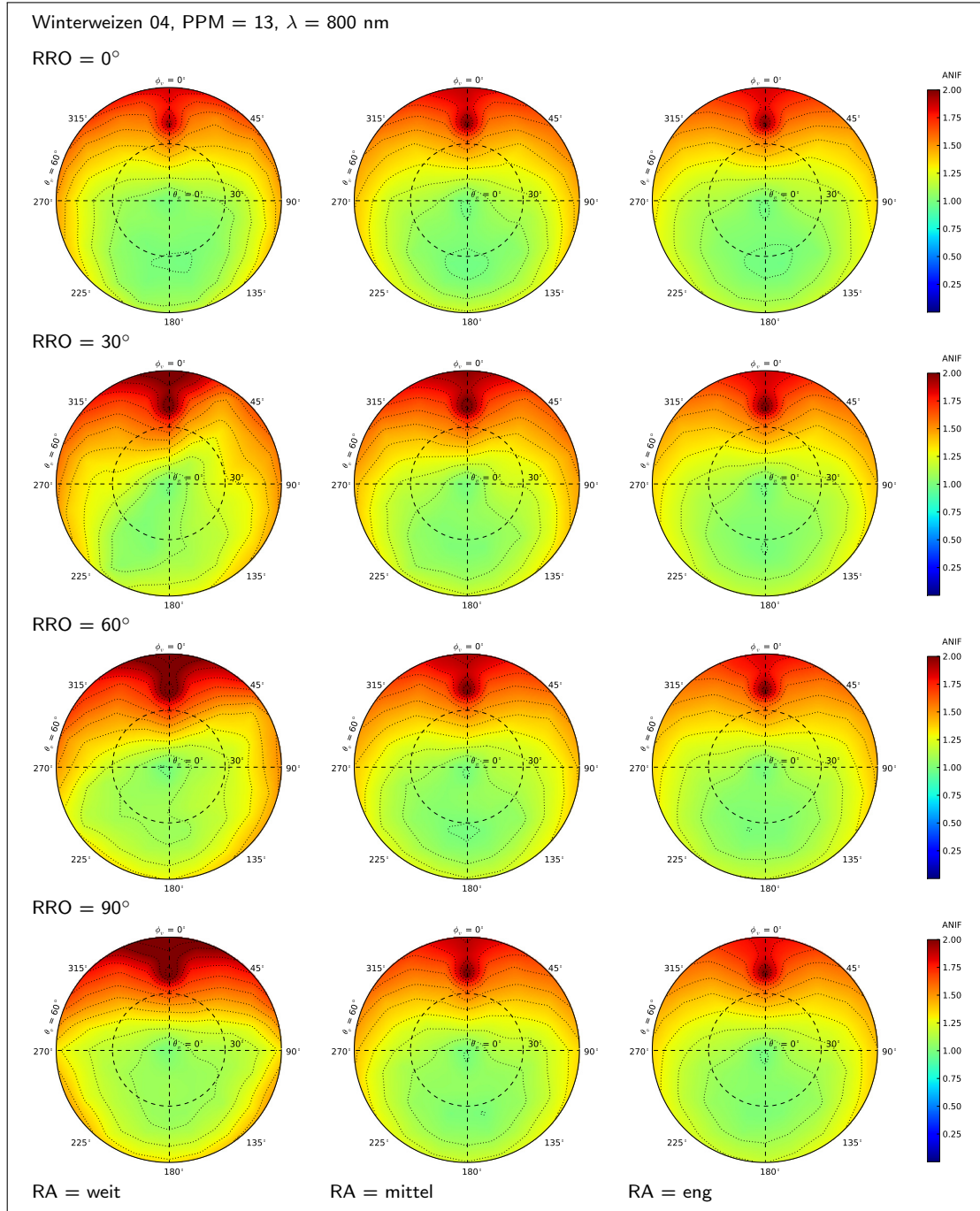


Abb. B.28 – ANIF-Werte der BRDF bei $\lambda = 800$ nm für WW04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

B.3 VIDF von Beständen unterschiedlicher Bestandsstrukturmerkmale im Wachstumsstadium 04

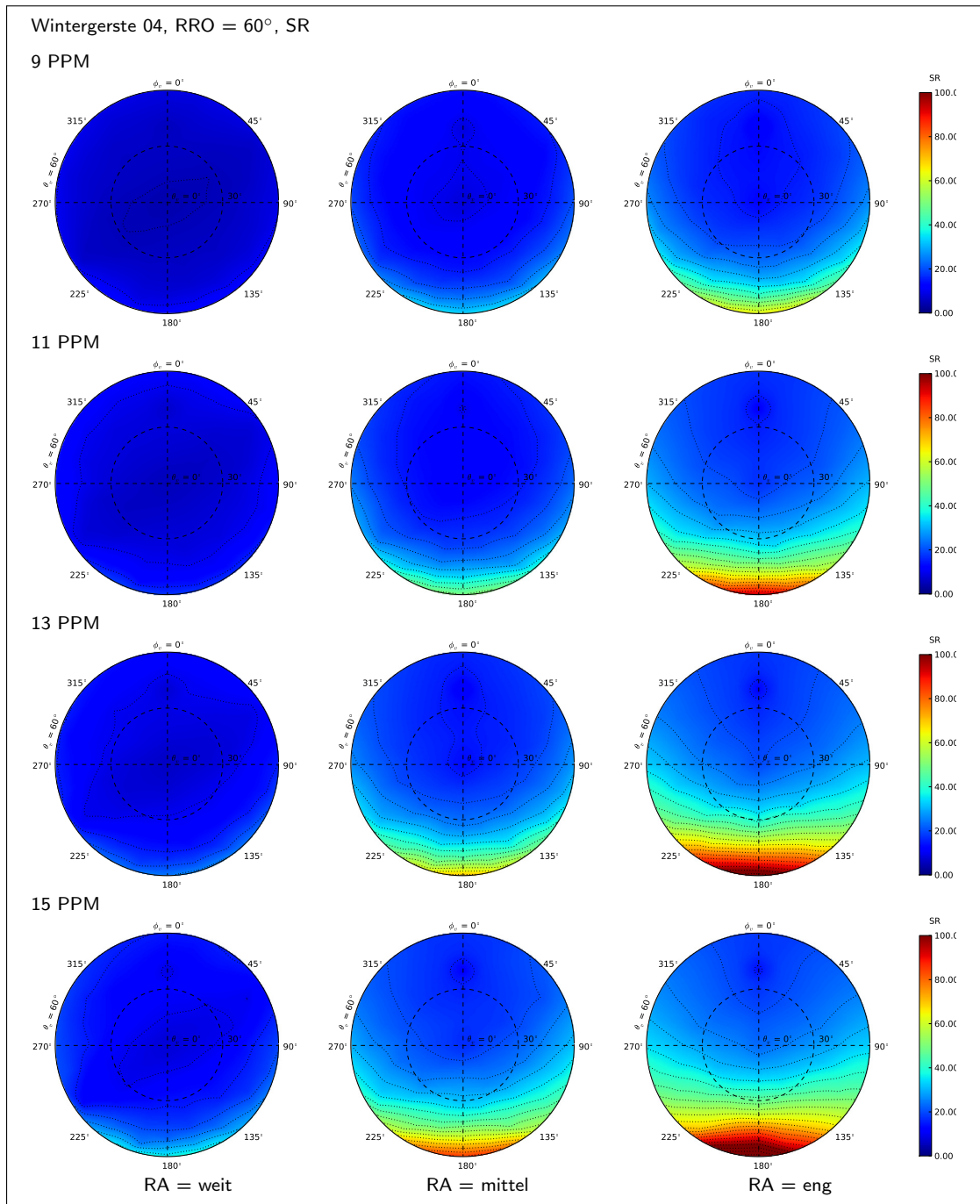


Abb. B.29 – VIDF von SR für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

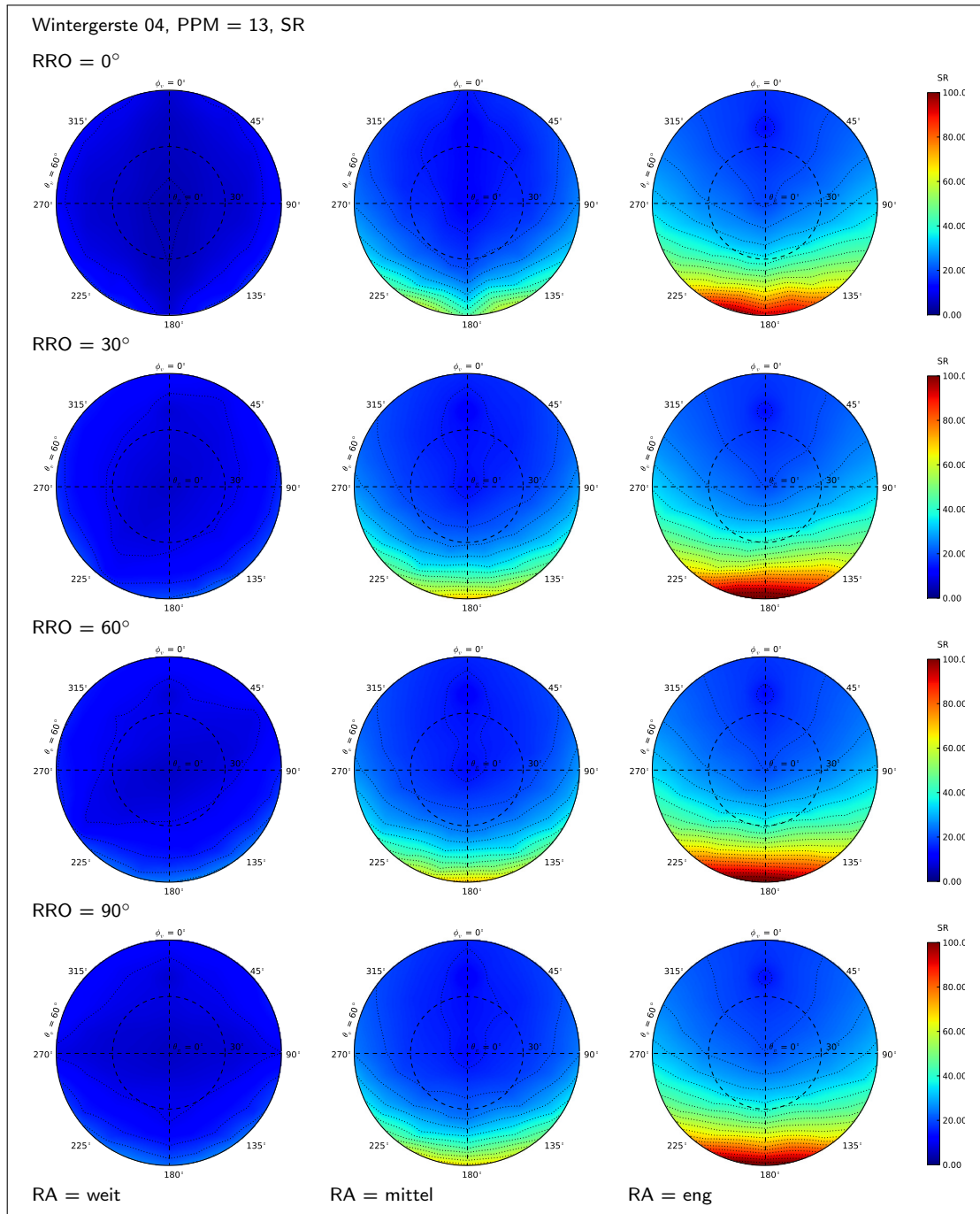


Abb. B.30 – VIDF von SR für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

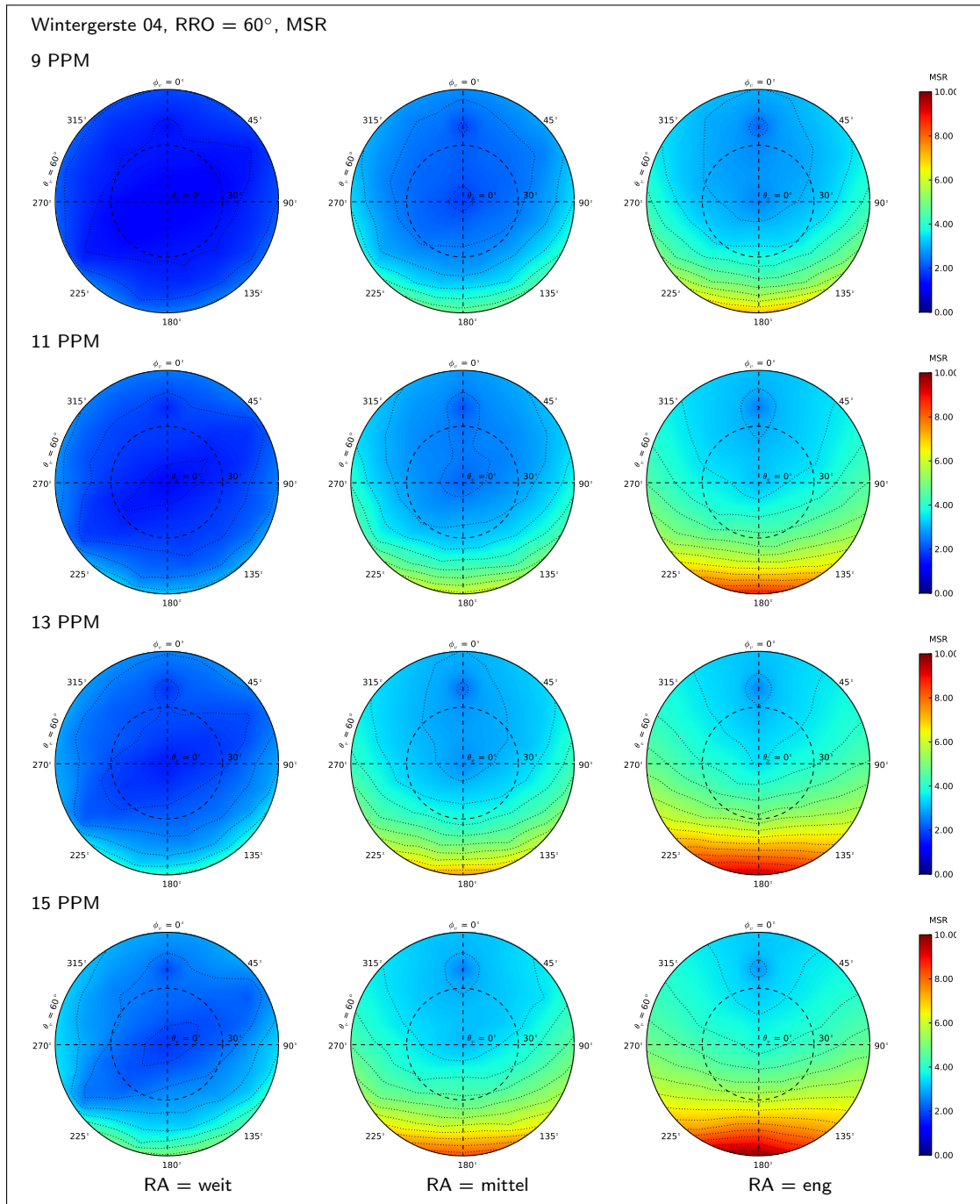


Abb. B.31 – VIDF von MSR für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

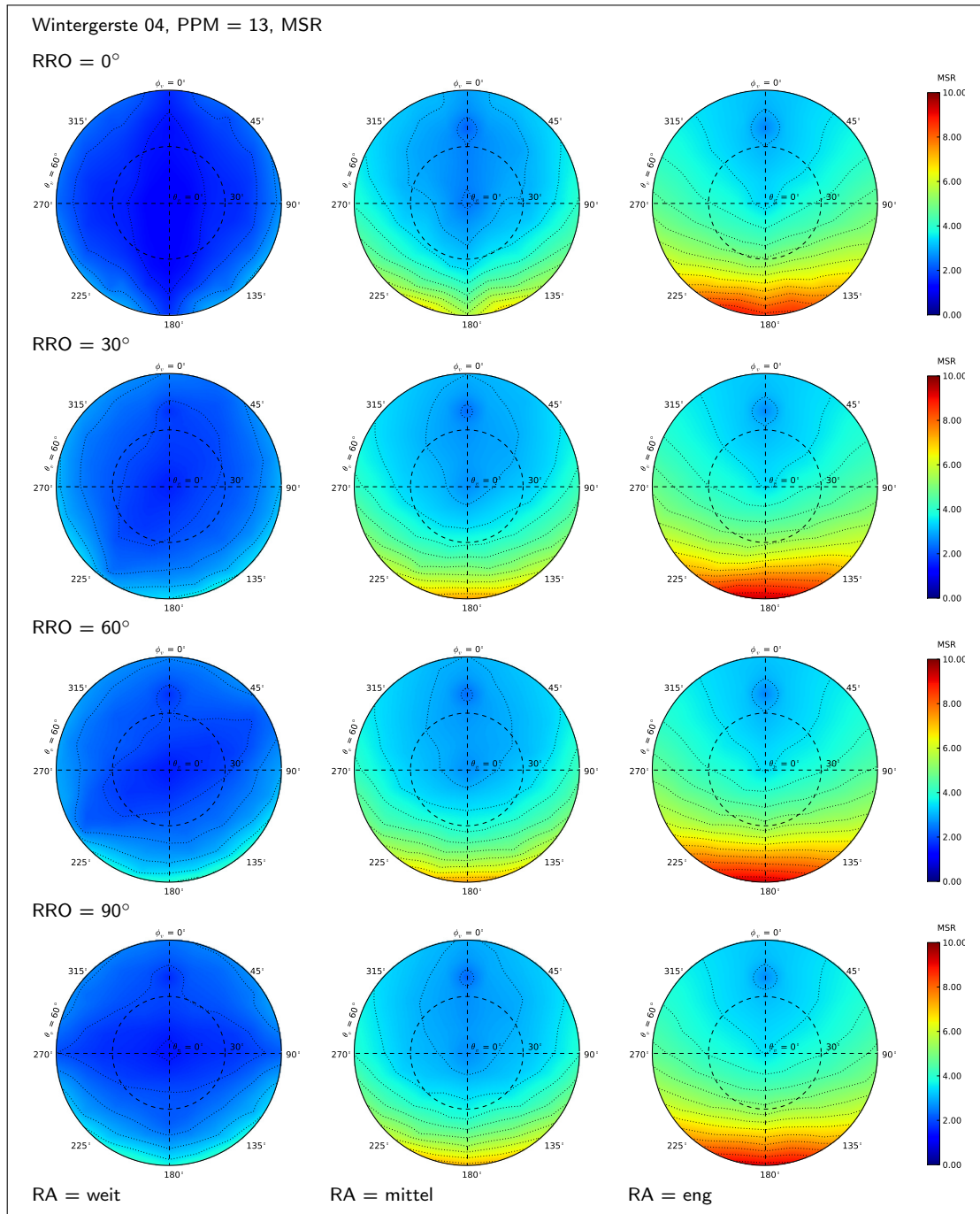


Abb. B.32 – VIDF von MSR für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

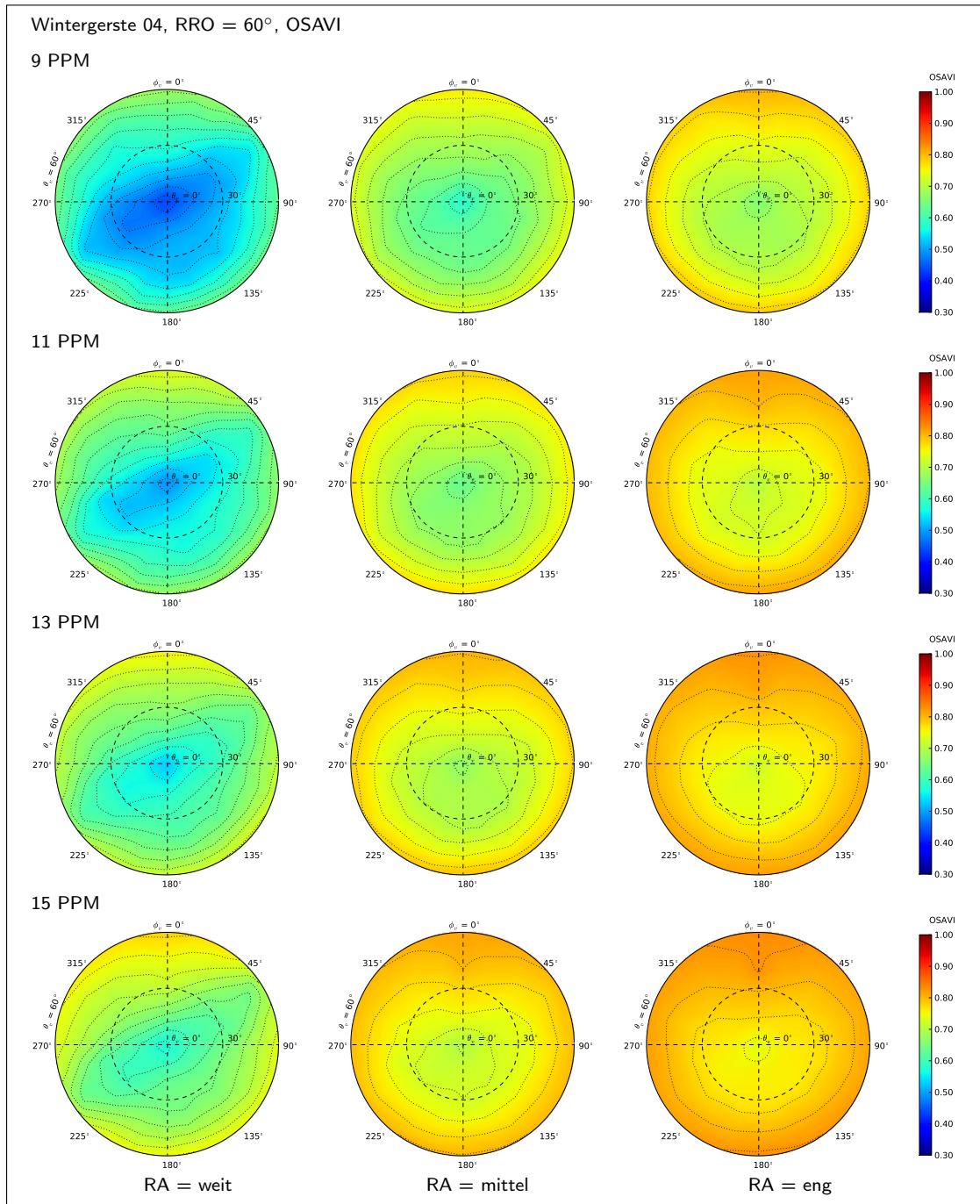


Abb. B.33 – VDF von OSAVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

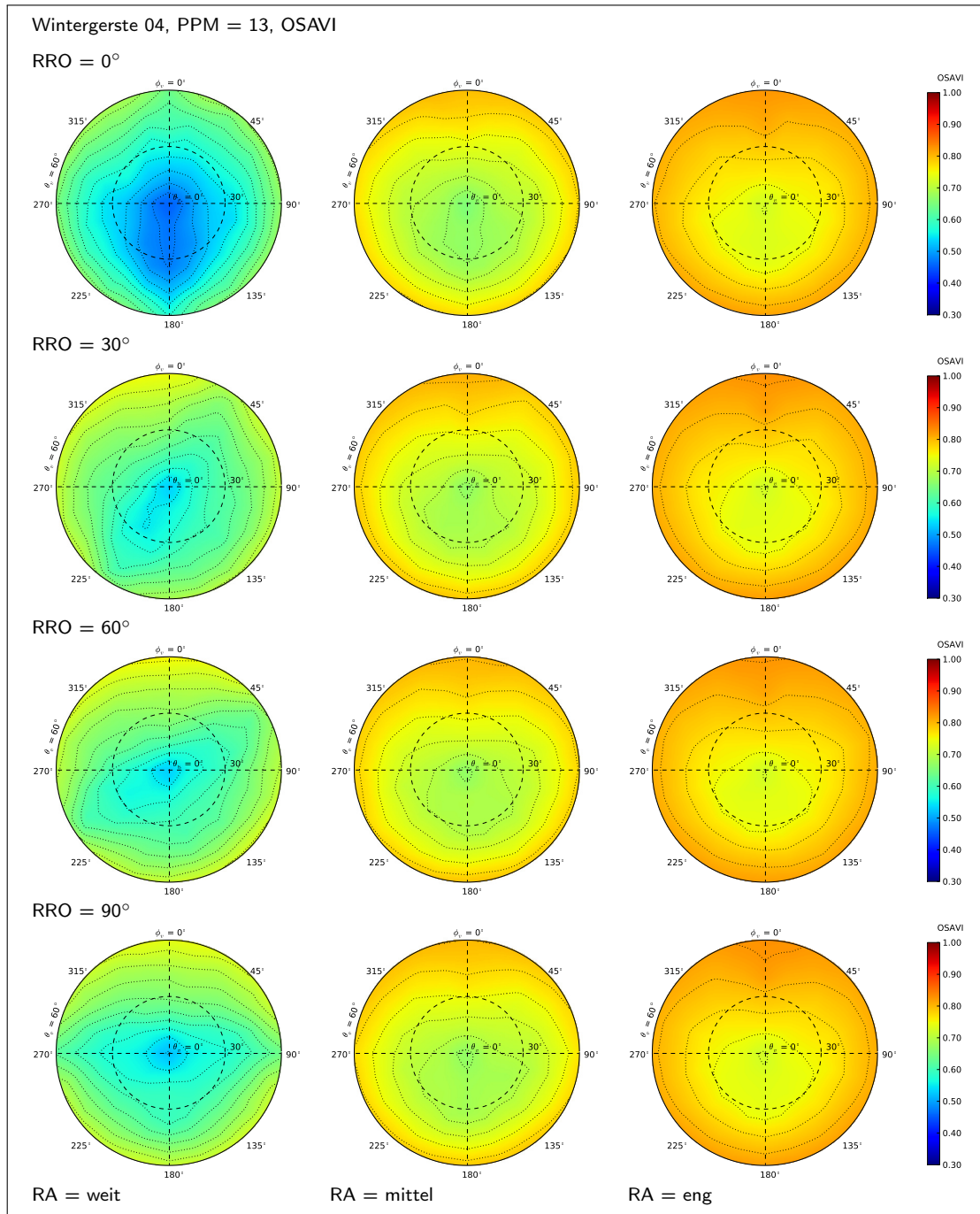


Abb. B.34 – VIDF von OSAVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

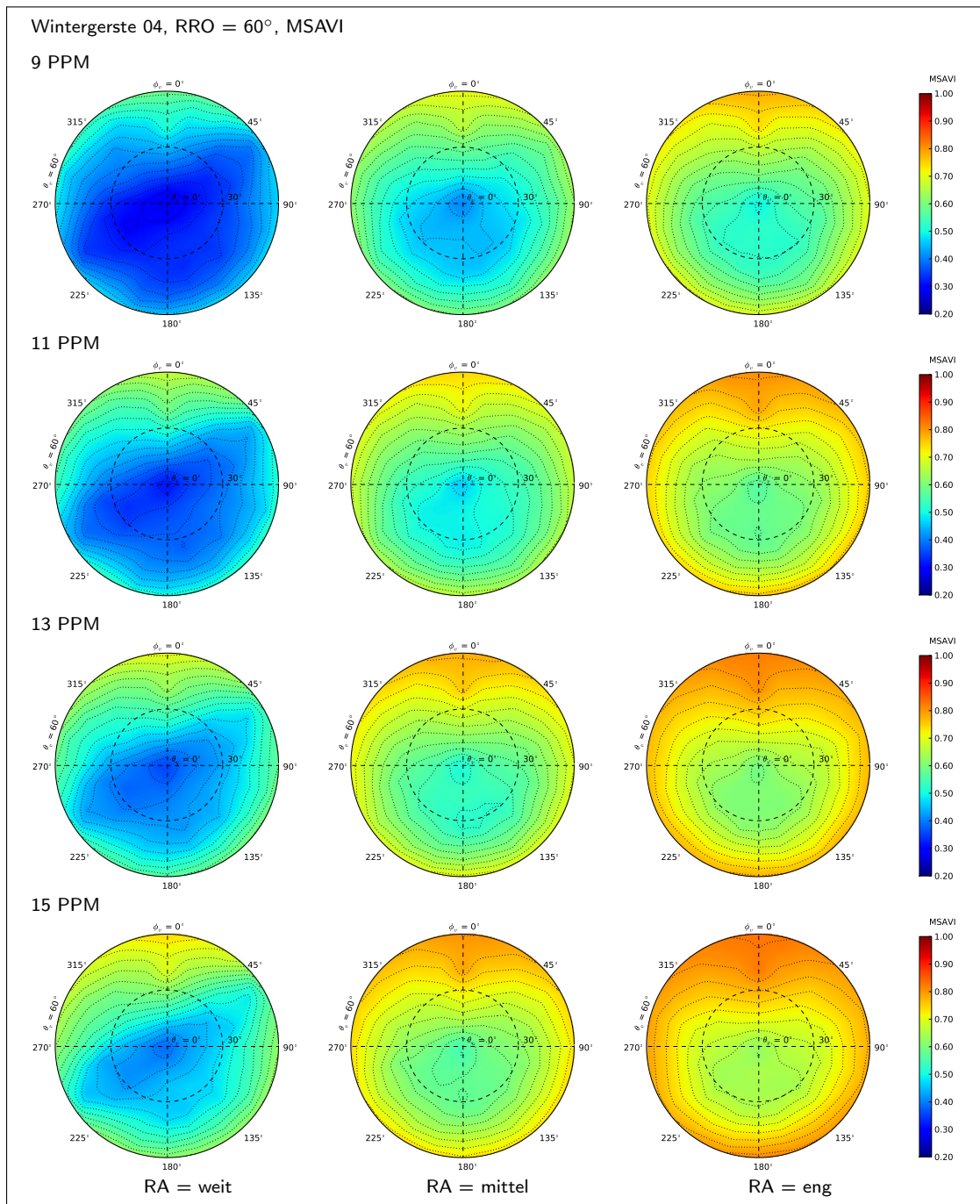


Abb. B.35 – VIDF von MSAVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

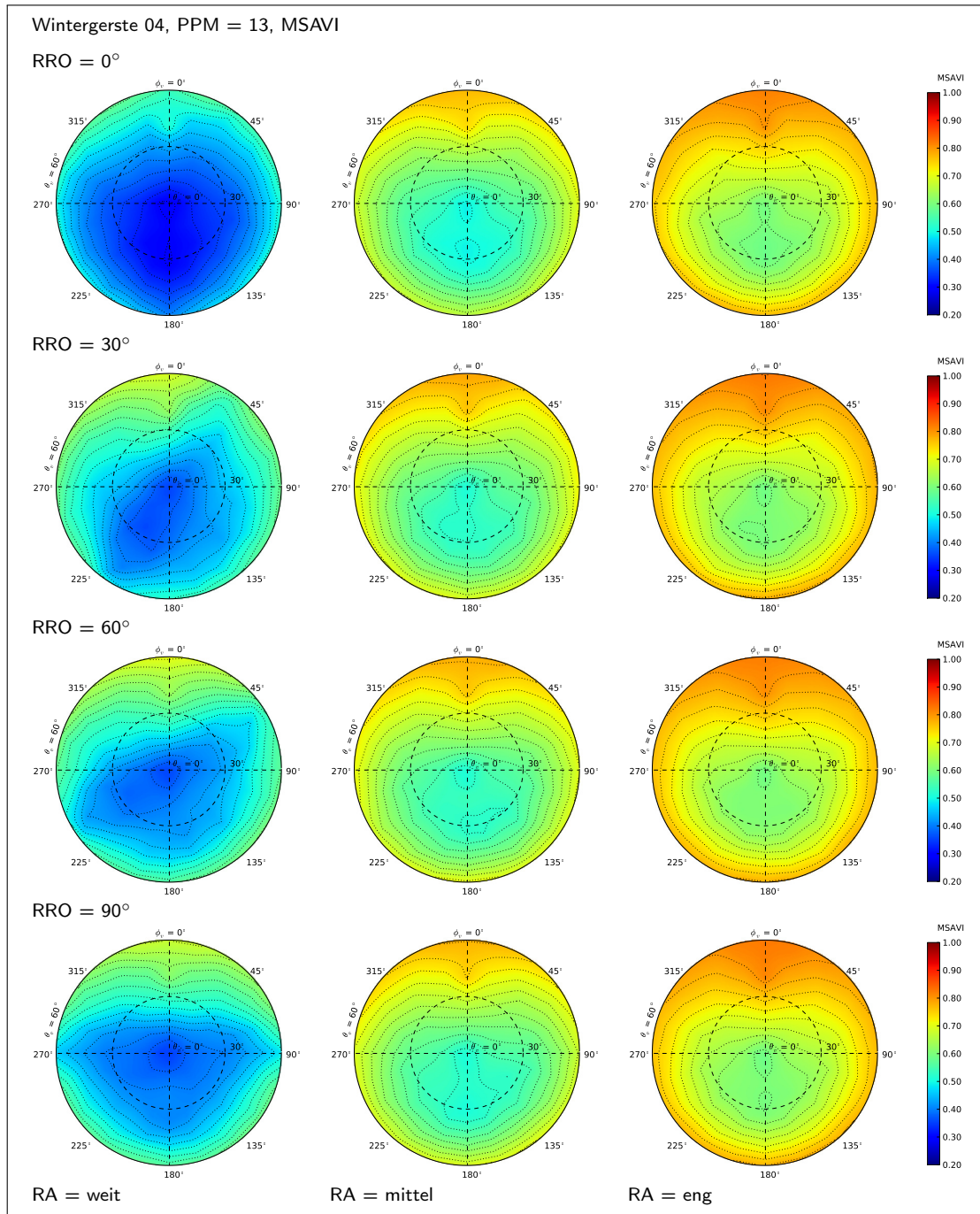


Abb. B.36 – VIDF von MSAVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

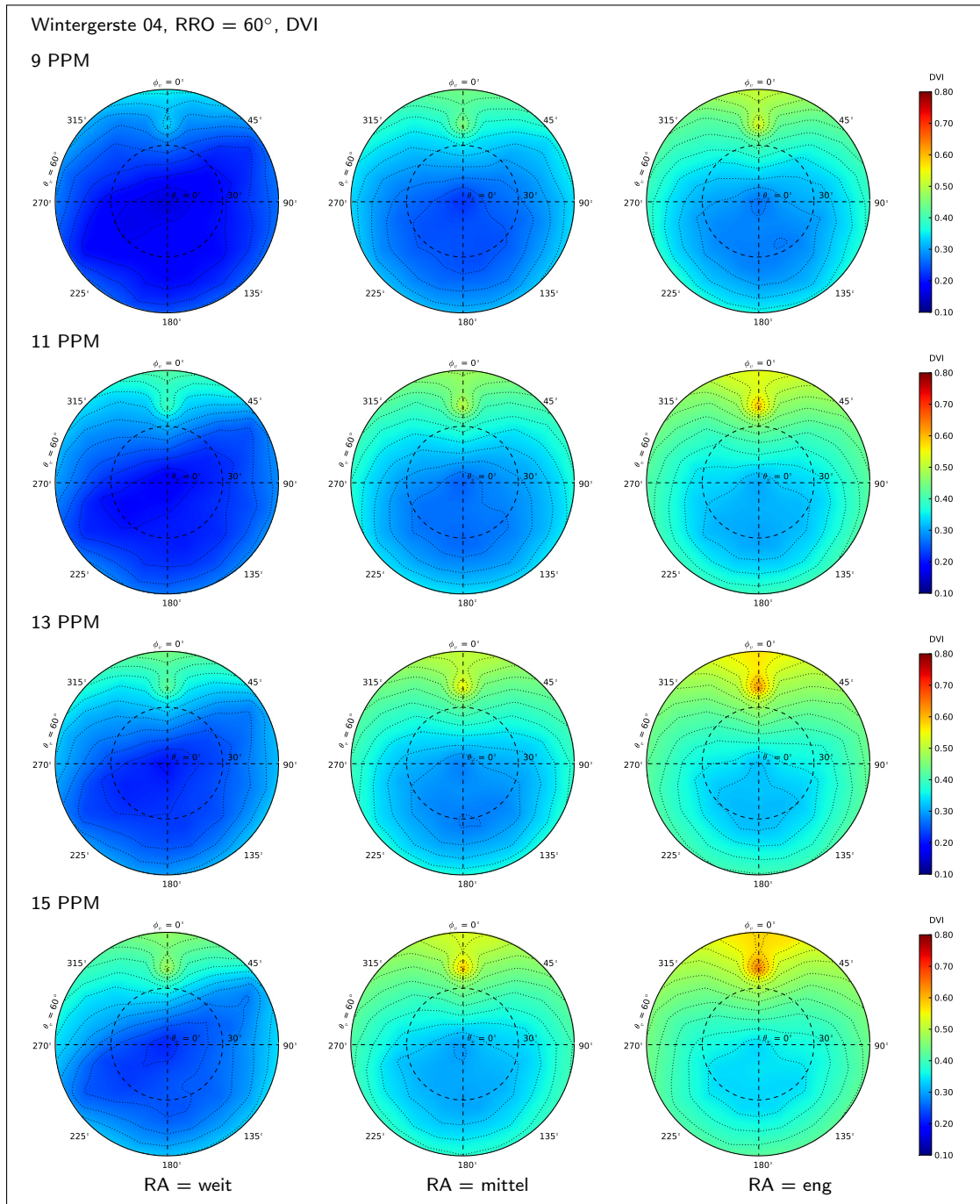
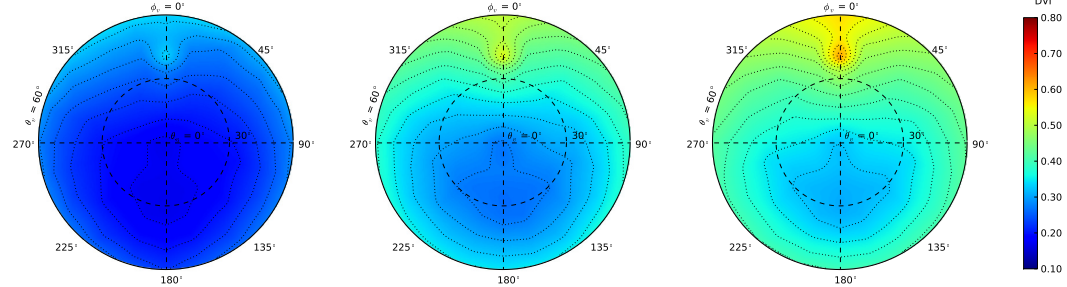


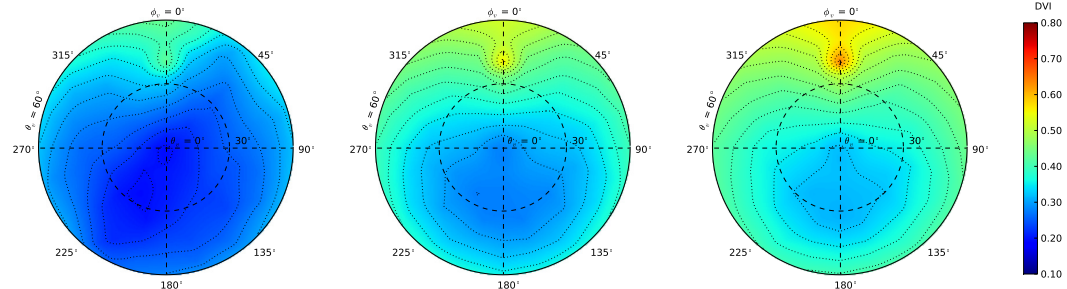
Abb. B.37 – VIDF von DVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

Wintergerste 04, PPM = 13, DVI

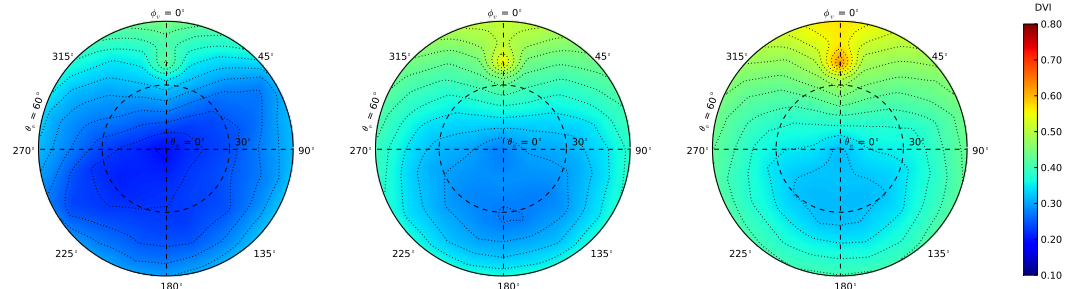
RRO = 0°



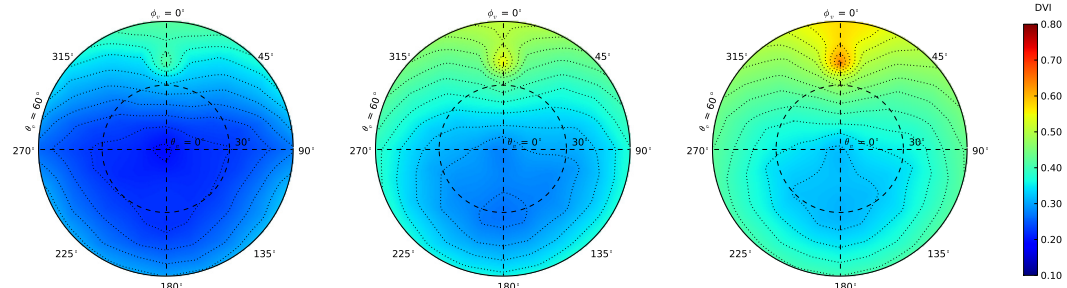
RRO = 30°



RRO = 60°



RRO = 90°



RA = weit

RA = mittel

RA = eng

Abb. B.38 – VIDF von DVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

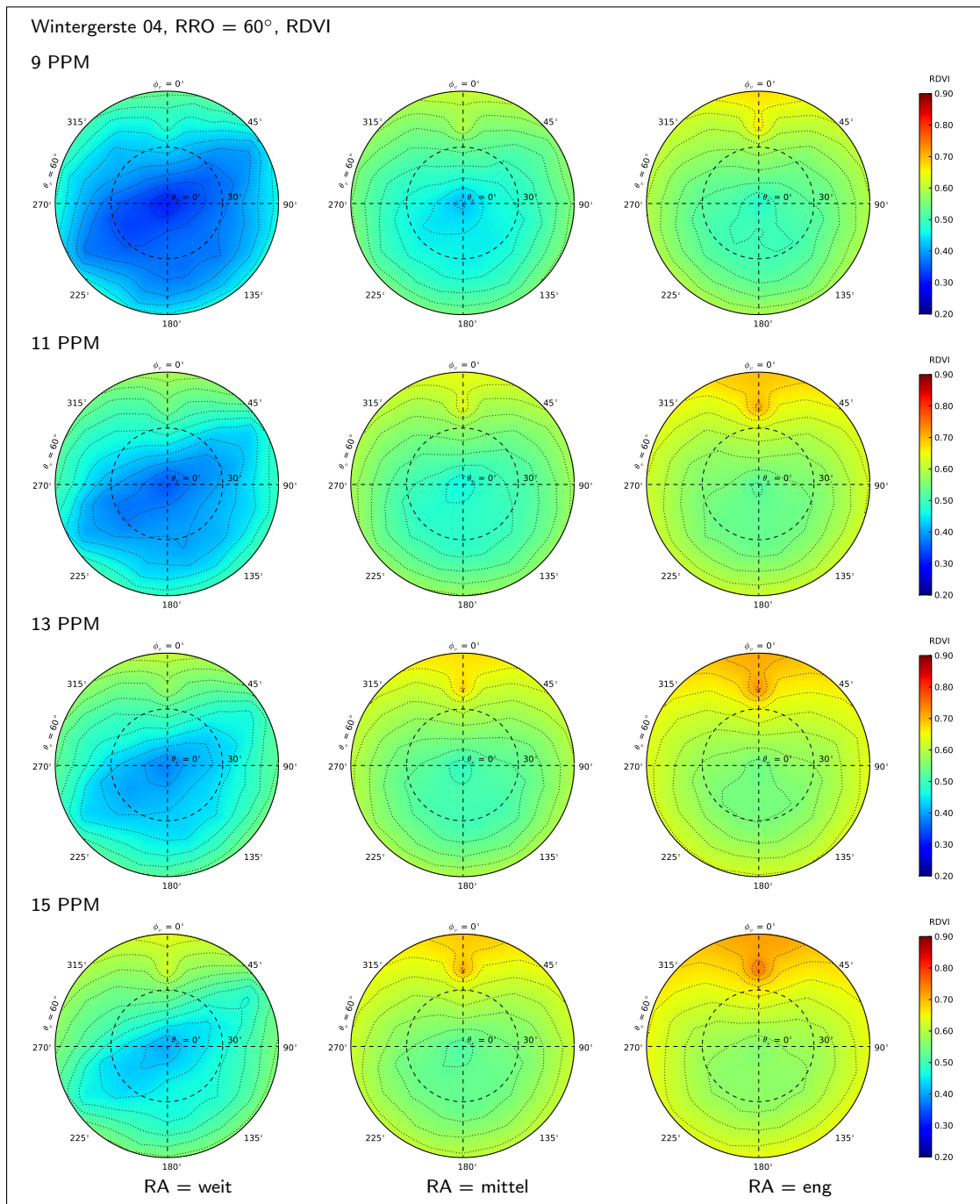


Abb. B.39 – VIDE von RDVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

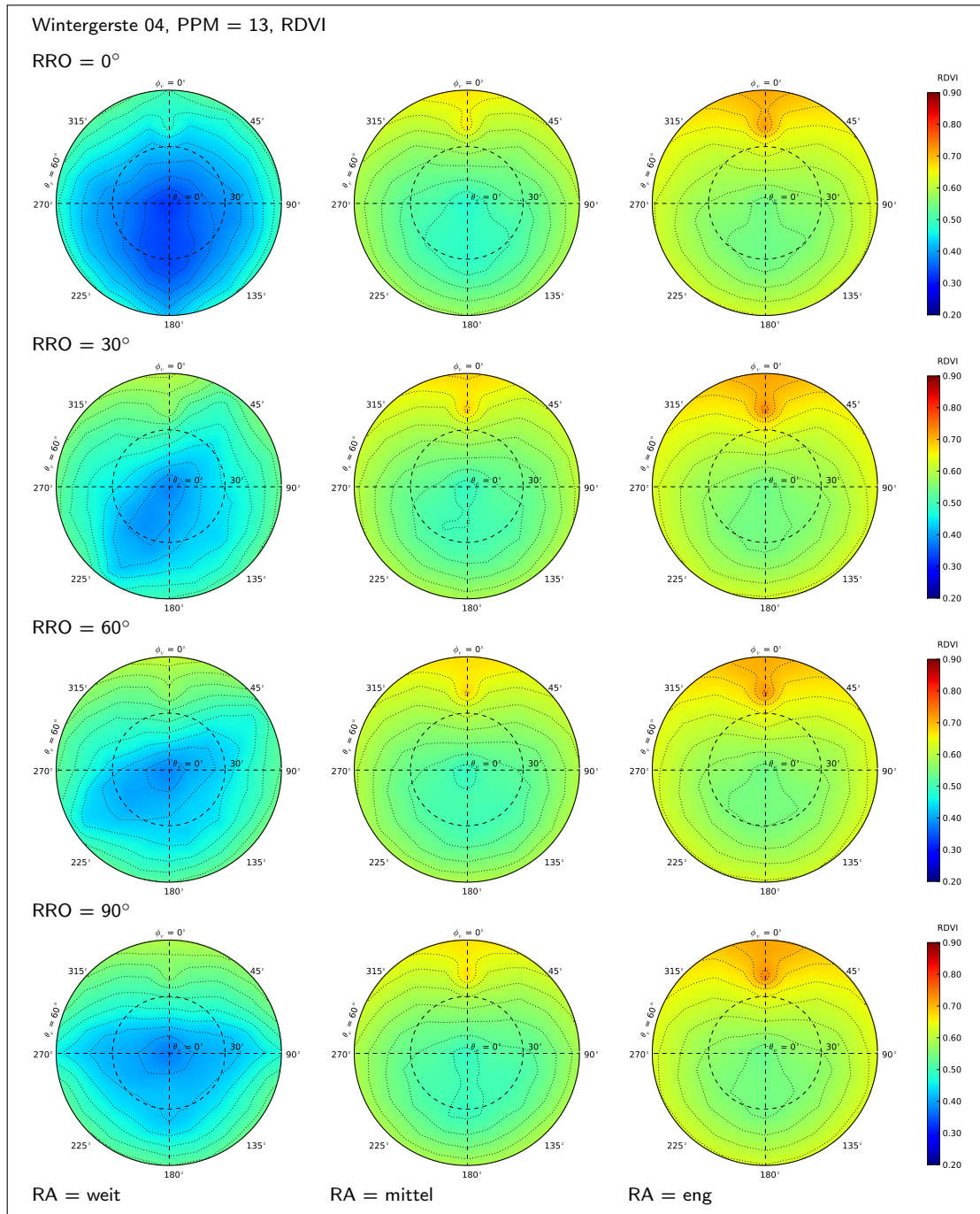


Abb. B.40 – VDF von RDVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

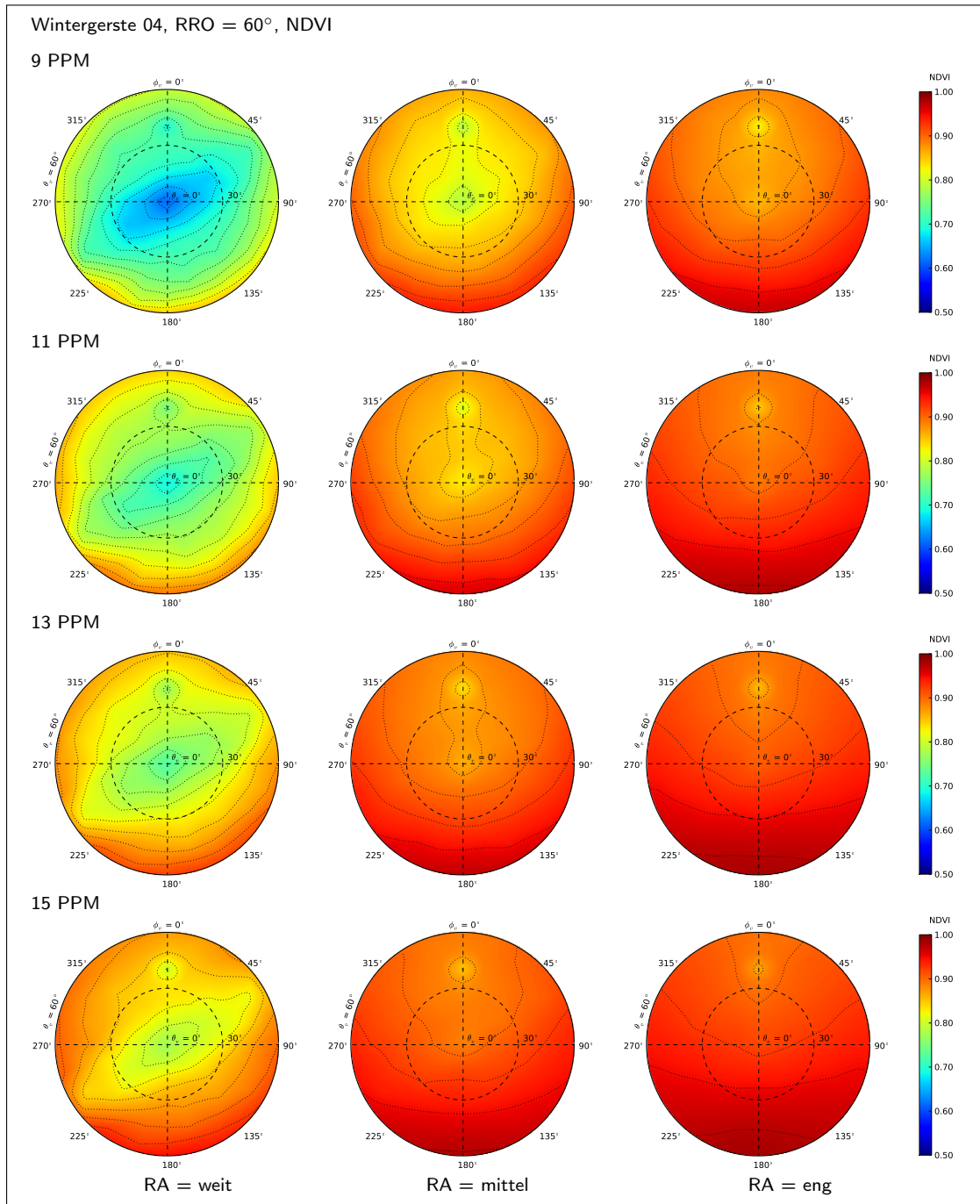


Abb. B.41 – VDF von NDVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

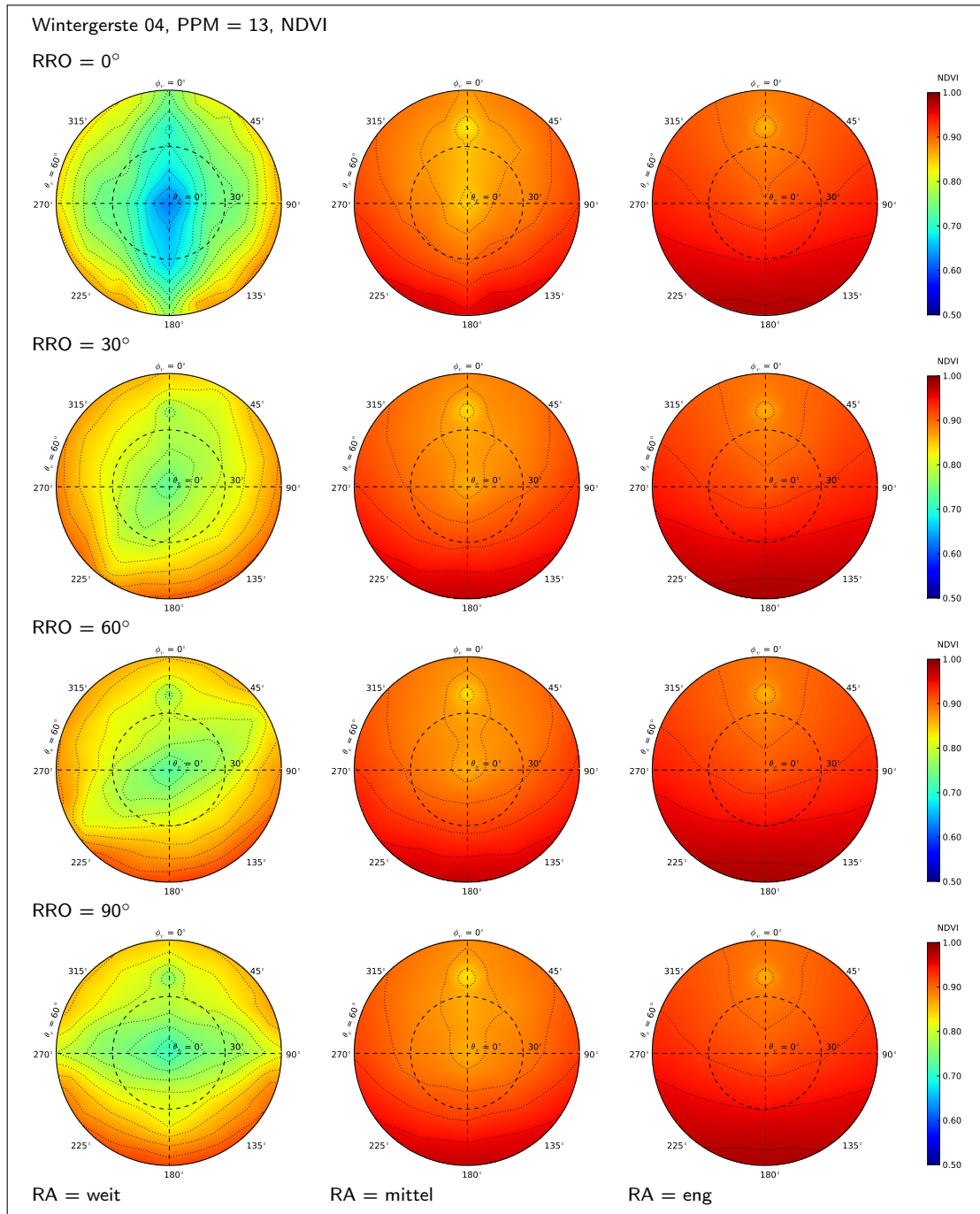


Abb. B.42 – VIDF von NDVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

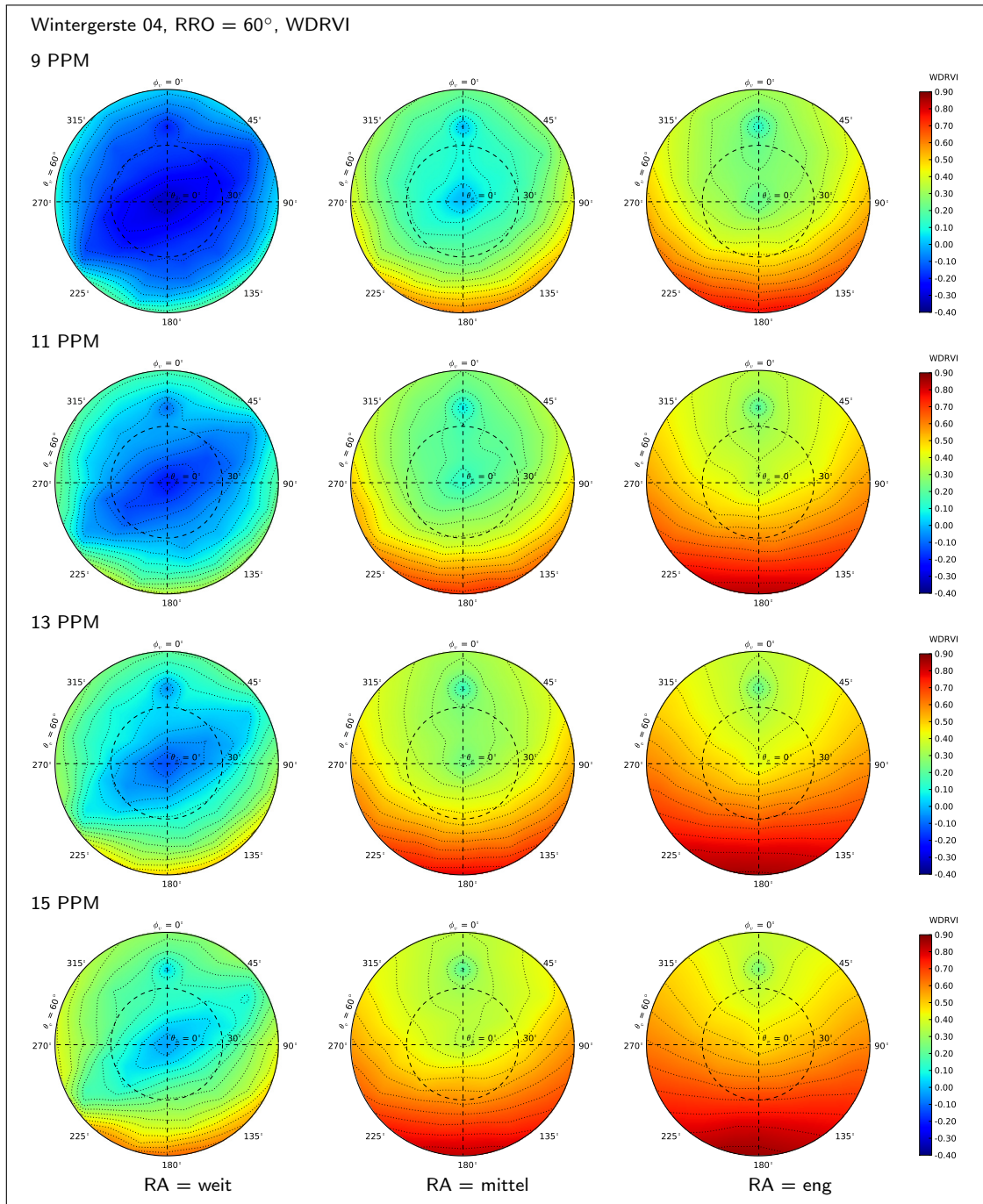


Abb. B.43 – VIDF von WDRVI für WB04-Bestände mit RRO = 60°, mit verschiedener Anzahl Pflanzen pro Reihe und Meter sowie mit weitem, mittlerem und engem RA.

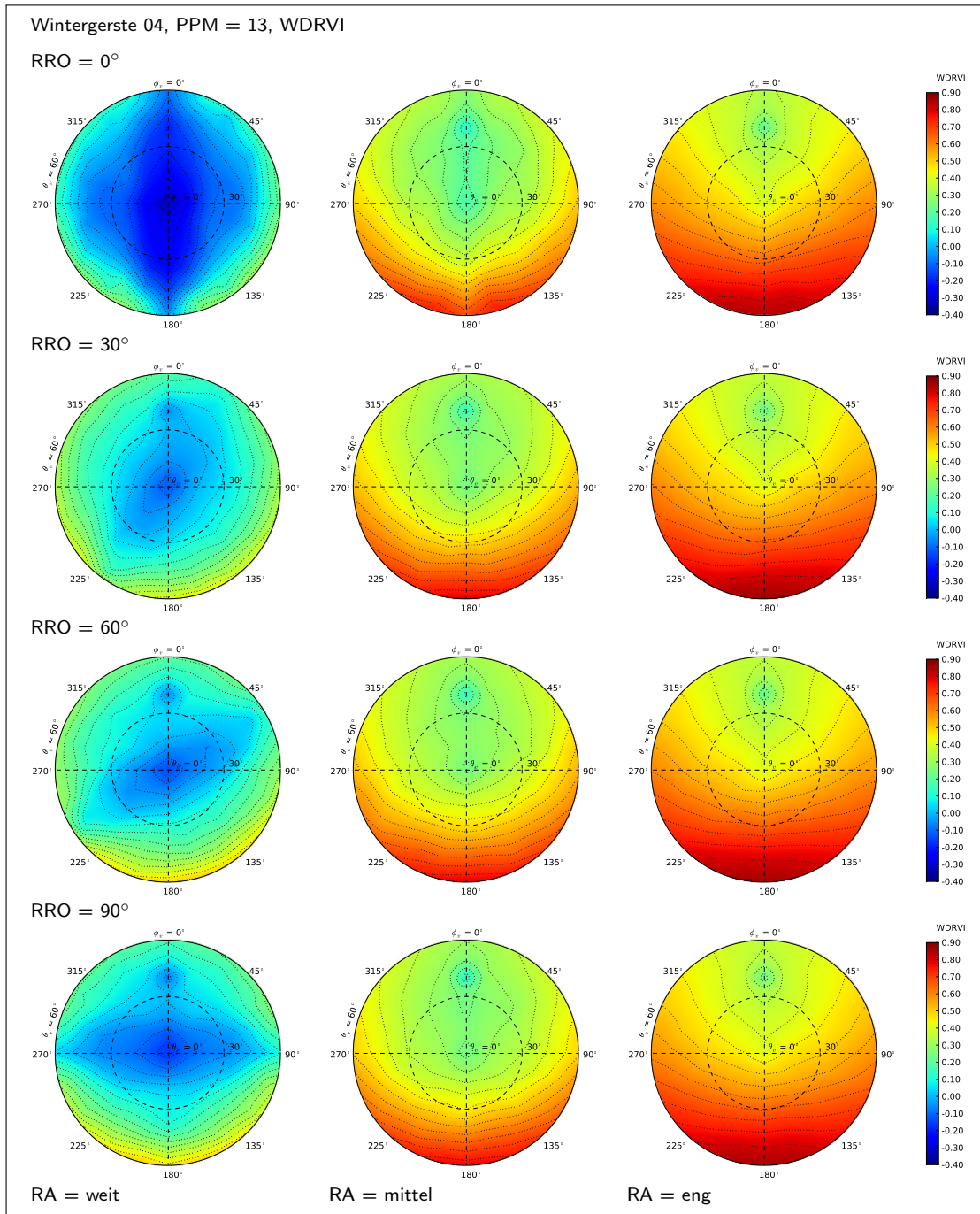


Abb. B.44 – VDF von WDRVI für WB04-Bestände mit variierendem RRO und RA und einer durchschnittlichen Anzahl an Pflanzen pro Reihe und Meter (13 PPM).

Dank

Die vorliegende Dissertation entstand am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam in der Sektion Fernerkundung. Mein besonderer Dank gilt daher dem Leiter der Sektion, Prof. Dr. Hermann Kaufmann, der mir exzellente Rahmenbedingungen für die Durchführung dieser Arbeit geschaffen hat und mir zudem die Präsentation meiner Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen ermöglichte. Des Weiteren danke ich ihm für die Begutachtung der Arbeit.

Prof. Dr. Patrick Hostert von der Humboldt-Universität zu Berlin spreche ich meinen herzlichen Dank für die Übernahme des Erstgutachtens aus.

Prof. Dr. Manfred Buchroithner hat mich schon während meines Studiums am Institut für Kartographie an der Technischen Universität Dresden fachlich begleitet. Ihm verdanke ich meinen Berufseinstieg als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Zudem ermöglichte er mir den Kontakt zu Prof. Dr. Hermann Kaufmann. Ich freue mich ihn als Gutachter meiner Dissertation gewonnen zu haben und bedanke mich ganz herzlich für seine andauernde Unterstützung.

Prof. Dr. Philip Lewis vom University College London stellte für die Dissertation freundlicherweise seine Raytracing-Software zur Verfügung. Dafür danke ich ihm ganz herzlich. Mein Dank gilt auch Jean-François Barczy für die andauernde Unterstützung bei der Modellierung der Pflanzen mit AMAPsim.

Dr. Karl Segl und Dr. Mathias Bochow möchte ich ebenfalls herzlich danken. Karl gilt mein besonderer Dank für die inhaltliche Betreuung und das Korrekturlesen. Mathias danke ich für seine Diskussionsbereitschaft und die Fähigkeit einen zu motivieren. Besonders danke ich meinem „Mitstreiter“ Daniel Spengler, der mir während unserer gemeinsamen Promotionszeit seine Daten zur Verfügung stellte und mir auch in vielen botanische Fragen mit Rat und Tat zur Verfügung stand. Ich wünsche ihm alles Gute für das Gelingen seiner Arbeit.

Ein herzlichen Dank gilt all meinen Kollegen in der Sektion Fernerkundung, die mit ihrer Hilfs- und Diskussionsbereitschaft sowie der freundschaftlichen Atmosphäre wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Ich möchte mich bei allen Korrekturlesern und anderen Beteiligten für die aufgebrachte Zeit und Nerven bedanken: Oliver Küster für die Durchsicht aller Kapitel, Dr. Karl Segl für die inhaltliche Kontrolle, Christiane Scheidt für die professionelle Rechtschreib- und Grammatikkontrolle und Dr. Heinrich und Dr. Ulla Linn für das sprachliche „Aufpolieren“.

Ich danke meinen Eltern für ihre vielseitige Unterstützung auf dem gesamten Weg meiner schulischen und universitären Ausbildung. Oliver danke ich für seine moralische Unterstützung und die schöne Zeit abseits der Wissenschaft.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Dissertation zum Thema

„Modellierung von Getreidebestandsspektren zur Korrektur BRDF-bedingter Einflüsse auf Vegetationsindizes im Rahmen der EnMAP-Mission“

selbständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Literatur und sonstigen Quellen angefertigt habe.

Berlin, den 4. Oktober 2011

Theres Küster (geb. Peisker)